



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA**  
**Facultad de Tecnología de la Construcción**

## **Monografía**

**DISEÑO DE ESPESOR DE PAVIMENTO DE CONCRETO COMPACTADO CON  
RODILLO MEDIANTE EL METODO PROPUESTO POR LA ASOCIACION DEL  
CEMENTO PORTLAND (PCA) APLICADO AL TRAMO DE CARRETERA “SAN  
SEBASTIAN DE YALI – CONDEGA”.**

Para optar al título de ingeniero civil

## **Elaborado por**

Br. Irayda María Smith Turcios.

Br. Ralph Sandy Halford Sáenz.

## **Tutor**

Ing. Alejandro Arévalo Gutiérrez

Managua, Marzo 2018



DEC-FTC-REF-No.400  
Managua, junio 10 del 2014.

Bachilleres  
IRAYDA MARIA SMITH TURCIOS  
RALPH SANDY HALFORD SAENZ  
Presente

Estimados Bachilleres:

Es de mi agrado informarles que el PROTOCOLO de su Tema Monográfico titulado "DISEÑO DE PAVIMENTOS DE CONCRETO COMPACTADO CON RODILLO MEDIANTE EL METODO PROPUESTO POR LA ASOCIACION DEL CEMENTO PORTLAND (PCA) APLICADO AL TRAMO DE CARRETERA "SAN SEBASTIAN DE YALI -CONDEGA", ha sido aprobado por esta Decanatura.

Asimismo les comunico estar totalmente de acuerdo, de que el Ing. ALEJANDRO AREVALO, sea el tutor de su trabajo final.

La fecha límite, para que presenten concluido su documento, debidamente revisado por el tutor guía será el 10 diciembre del 2014.

Esperando puntualidad en la entrega de la Tesis, me despido.

Atentamente,

Dr. Ing. Oscar Gutiérrez Somarriba  
Decano



CC: Protocolo  
Tutor  
Archivo\*Consecutivo  
DIOGS\*mary



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA  
FACULTAD DE TECNOLOGIA DE LA CONSTRUCCION  
DECANATURA

DEC.FTC.REF No. 1238  
Managua, diciembre 16 del 2014.

Bachilleres  
RALPH SANDY HALFORD SAENZ  
IRAYDA MARIA SMITH TURCIOS  
Presente

Estimados Bachilleres:

En atención a su carta de solicitud de PRORROGA, para finalizar su trabajo Monográfico titulado "DISEÑO DE PAVIMENTO COMPACTADO CON TODILLO MEDIANTE EL METODO PROPUESTO POR LA ASOCIACION DEL CEMENTO PORTLAND (PCA) APLICADO AL TRAMO CARRETERO SAN SEBASTIAN DE YALI-CONDEGA". Esta Decanatura aprueba la misma considerando los problemas planteados en su comunicación.

Deberán presentar concluida su Tesis debidamente revisada por el tutor guía el 17 de febrero del 2015.

Esperando de ustedes puntualidad en la entrega de su trabajo final, me despido.

Atentamente,

Dr. ING. OSCAR GUTIERREZ SOMARRIBA  
Decano



CC: Tutor  
Archivo-Consecutivo





UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA  
FACULTAD DE TECNOLOGIA DE LA CONSTRUCCION  
DECANATURA

DEC.FTC.REF No. 002  
Managua, enero 11 del 2016.

Bachilleres  
RALPH SANDY HALFORD SAENZ  
IRAYDA MARIA SMITH TURCIOS  
Presente

Estimados Bachilleres:

En atención a su carta de solicitud de PRORROGA, para finalizar su trabajo Monográfico titulado "DISEÑO DE PAVIMENTO COMPACTADO CON RODILLO MEDIANTE EL METODO PROPUESTO POR LA ASOCIACION DEL CEMENTO PORTLAND (PCA) APLICADO AL TRAMO CARRETERO SAN SEBASTIAN DE YALI-CONDEGA". Esta Decanatura aprueba la misma considerando los problemas planteados en su comunicación.

Deberán presentar concluida su Tesis debidamente revisada por el tutor guía el 11 de abril del 2016.

Esperando de ustedes puntualidad en la entrega de su trabajo final, me despido.

Atentamente,



Dr. ING. OSCAR GUTIERREZ SOMARRIBA  
Decano

CC: Tutor  
Archivo-Consecutivo

Managua, 20 de Marzo de 2018

**Ingeniero**  
**Oscar Gutiérrez Somarriba**  
**Decano Facultad Tecnología de la Construcción (FTC)**  
**UNI-RUPAP**

**Sus manos**

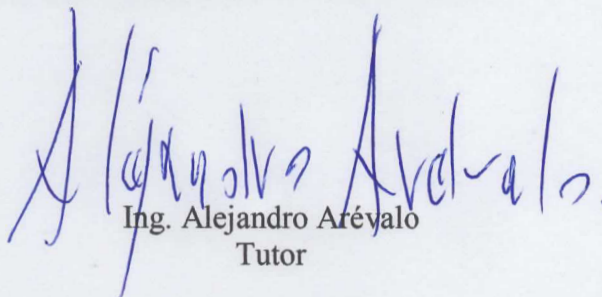
**Ref.: Revisión de Trabajo Monográfico**

Estimado Ing. Gutiérrez;

A través de la presente hago constar que he revisado el trabajo monográfico con el tema: **DISEÑO DE ESPESOR DE PAVIMENTO DE CONCRETO COMPACTADO CON RODILLO MEDIANTE EL METODO PROPUESTO POR LA ASOCIACION DEL CEMENTO PORTLAND (PCA) APLICADO AL TRAMO DE CARRETERA "SAN SEBASTIAN DE YALI - CONDEGA"**, presentado por los bachilleres Irayda Smith Turcios y Ralph Halford Sáenz, el cual, está listo para ser defendido ante la junta de profesores encargados de evaluarlos.

Sin más a que referirme me despido deseándole un excelente día.

Atentamente,

  
Ing. Alejandro Arévalo  
Tutor

CC.: Archivo

## **DEDICATORIA**

Esta monografía es dedicada a nuestros hijos, padres, amigos y familiares que con sus consejos y apoyo incondicional nos ayudaron en toda esta etapa de nuestras vidas.

## AGRADECIMIENTO

Quiero agradecerle ante todo a Dios padre supremo y creador del cielo y de la tierra, a mis padres por ser ejemplares que me enseñaron a ser una persona de bien para la sociedad, pero de manera muy especial quiero agradecerle a mi madre **Rosa Mex Turcios González**, que ha sido una mujer guerrera e hizo todo los sacrificios posibles para que yo hoy lograra culminar una etapa de mi vida.

A mi esposo por su ayuda y comprensión, a mis hijos por ser el motor que me empuja cada día ser mejor.

A mis maestros que con paciencia y dedicación imparten sus conocimientos.

Irayda María Smith Turcios

---

Quiero agradecer a Dios sobre todas las cosas, a mi padre **Ralf Stanley Halford Kain**, a mi madre **Aura Xiomara Sáenz Calderón** padres ejemplares, que con sabiduría, reprensión y amor me han inculcado el buen camino.

A mis amigos, esposa y familiares que me dieron su apoyo incondicional para que esta etapa profesional de mi vida fuera posible.

Ralph Sandy Halford Sáenz



## **RESUMEN DEL TEMA**

La adquisición de conocimientos mediante procesos investigativos para la ejecución y evaluación de nuevos procesos constructivos fue la motivación de realizar este estudio monográfico en base al diseño de espesores de concretos compactados con rodillos.

Se determinó que el método propuesto por la PCA (Portland Cement Association) era el más conveniente a ser aplicado, esto considerando los estudios realizados por esta asociación en tramos a escala real de este tipo de pavimento rígido como es el CCR. Además, la PCA, ha propuesto una guía para pavimentos compactados con rodillo la cual contiene información muy incidente al momento de implementar la metodología de diseño.

Definidas nuestras directrices de diseño era de suma importancia obtener información de campo objetiva para la obtención de nuestras variables de diseño como es el valor de la subrasante. Por ello, se solicitó al Ministerio de Transporte e Infraestructura (MTI) información fidedigna de un proyecto que haya pasado por la etapa de factibilidad, dándonos respuesta positiva, se no otorgó el diseño del tramo de carretera San Sebastián de Yali-Condega para este fin, particularmente la información de CBR y TPDA.

Iniciando la etapa de gabinete se realizó la proyección del Tráfico Promedio Diario Anual, luego se calculó las repeticiones esperadas hasta el año de diseño y consiguiente se hizo la descomposición de ejes vehiculares.

Como segunda etapa se tendrá que procesar la información de CBR que mediante el método de diferencias acumuladas determinaremos secciones homogéneas y por ende los CBR más críticos en los tramos más significativos. Teniendo los CBR a ser considerado obtendremos los módulos de la subrasante del suelo (valor  $k$ ) mediante tablas de correlaciones y así mismos los  $k$  compuesto.

Luego, se tomaron las consideraciones y criterios necesarios para definir los valores de las propiedades ingenieriles de un pavimento de concreto compactado con rodillo. En este punto se requirió un proceso investigativo para entender, según bibliografía disponible, el comportamiento de dicho pavimento. Esta etapa es la diferencia

## INDICE

### CAPITULO 1

1.1. Introducción.....	1
1.2. Antecedentes.....	4
1.3. Justificación.....	6
1.4. Objetivo General.....	7
1.5. Objetivos Específicos. ....	7

### CAPITULO 2

#### PAVIMENTOS DE CONCRETO COMPACTADOS CON RODILLOS – CCR.

2.1. Generalidades.....	8
2.2. Materiales Constituyentes.....	9
2.2.1. Agregados.....	8
2.2.2. Cemento.....	10
2.2.3 Agua.....	11
2.2.4. Aditivos.....	13

### CAPITULO 3

#### PROPIEDADES INGENIERILES, ESFUERZOS Y DEFLEXIONES.

3.1. Propiedades ingenieriles .....	14
3.2. Resistencia a la Compresión.....	14
3.3. Esfuerzos de Flexión o de Ruptura.....	16
3.4. Módulo de Elasticidad.....	17
3.5. Retracción.....	18
3.6. Comportamiento a la Fatiga.....	18
3.7. Comportamiento a la erosión.....	21
3.8. Comportamiento a la Temperatura.....	22
3.9. Durabilidad.....	23

## **CAPITULO 4**

### **4.1 MÓDULO DE REACCIÓN DE LA SUB-RASANTE (VALOR “K”).....24**

## **CAPITULO 5**

### **ESFUERZOS Y DEFLEXIONES EN PAVIMENTOS RÍGIDOS**

5.1. Esfuerzos Constructivos.....	26
5.2. Esfuerzos por Temperatura.....	26
5.3. Esfuerzos por Tráfico.....	27

## **CAPITULO 6**

6.1. Características restrictivas y ventajas de los pavimentos compactados con rodillos .....	29
6.2. Normas internacionales para el diseño de espesores de pavimentos rígidos convencionales y de CCR .....	31
6.3. Método de la AASHTO.....	31
6.4. Método de la PCA.....	32
6.5. Elección del método de diseño para pavimento de CCR.....	33

## **CAPITULO 7**

### **DISEÑO Y CALCULO DE ESPESORES DE PAVIMENTO**

7.1. Estudio de tráfico .....	36
7.2. metodología para obtención del tránsito promedio diario proyectado.....	31
7.3. anual	
7.3. Calculo de repeticiones anuales esperadas.....	34
7.4. Descomposición de eles vehiculares .....	40
7.5. Cálculo del módulo de reacción de la sub-rasante (valor K).....	42
7.5.1. Obtención del CBR de campo.....	42
7.5.2. Definición de secciones homogéneas para valores de CBR de campo.....	42
7.5.3 Cálculo de valor “K” mediante tabla de correlaciones.....	46

<b>7.6. CÁLCULO DE ESPESOR DE PAVIMENTO MEDIANTE EL ANÁLISIS DE FATIGA Y EROSIÓN.....</b>	<b>49</b>
7.6.1. Variables de diseño para Pavimentos sin apoyo lateral o acotamiento....	49
7.6.1.1 Análisis por fatiga.....	50
7.6.1.2. Análisis por erosión.....	52
7.6.2. Variables de diseño para pavimento con Apoyo lateral o acotamiento....	54
7.6.2.1. Análisis por fatiga.....	55
7.6.2.2. Análisis por Erosión.....	57
7.6.3. Evaluación económica para elección del pavimento.....	59
<b>7.7. DISEÑO DE JUNTAS.....</b>	<b>61</b>
7.7.1. Diseño de juntas transversales.....	61
7.7.2. Diseño de juntas longitudinales.....	62
<b>7.8. OBTENCION DE ESFUERZO EN LA LOS MEDIANTE EL PROGRAMA ELEMENTO FINITO.....</b>	<b>63</b>
7.8.1 Preámbulo.....	63
7.8.2. Cálculo de esfuerzos principales con carga ubicada al centro de la losa.....	65
7.8.3. Cálculo de esfuerzos principales con carga ubicada en el borde de la losa.....	68
7.8.4. Cálculo de esfuerzos principales con carga ubicada en juntas de la losa.....	70
7.8.5. Análisis de resultados.....	72
8. CONCLUSIONES.....	73
9. RECOMENDACIONES.....	74
10. BIBLIOGRAFIA.....	75

## CAPITULO 1

---

### 1.1. Introducción

El volumen de vehículos automotores en Nicaragua registró una tasa de crecimiento media anual del 7.8%, llegando a 646,935 vehículos de diferentes características. Del total de vehículos automotores registrados en el país el 25% corresponde a los de pasajeros (automóviles y autobuses), el 33% a los de camiones de carga, el cual movilizó aproximadamente 6 millones de toneladas en el 2015, el 41% a las motocicletas y ciclomotores, el 0.6% a las unidades agrícolas y el 0.2% a las unidades de construcción.

<sup>1</sup>Ahora bien, observando la oferta de país, este consta con una infraestructura vial de 24,171.66 km lineales, de ellos 70.5% de las carreteras son transitables en todo tiempo y el 29.5% solo en verano.

En su conjunto, el 16.1% corresponden a carreteras pavimentadas y el 83.9% a las carreteras sin pavimentar. En el siguiente cuadro se refleja la distribución de la red vial al 2015 según el tipo de superficie:

TIPO DE SUPERFICIE	DISTRIBUCION PORCENTUAL (%)	LONGITUD (KM)
Todo Tiempo	40.50	9,789.52
Estación Seca	29.50	7,130.64
Asfaltado	10.20	2,465.51
Adoquinado	5.30	1,281.10
Concreto Hidráulico	0.60	145.03
Empedrados	0.10	24.17
Revestidos	13.80	3,335.69

---

<sup>1</sup> Anuario Estadístico de Transporte 2015 – División General de Planificación MTI



Del total de la red pavimentada, las asfaltadas representaron el 63.4% de eso el 32.7% corresponden a las adoquinadas y el 3.9% a las carreteras de concreto hidráulico.

El análisis oferta – demanda actual del país, en referencia al transporte terrestre, nos lleva a diagnosticar, esto según el Ministerio de Transporte e Infraestructura, que poseemos uno de los indicadores de accesibilidad más alto de Centroamérica de 8 horas y con un grado de movilidad tendiendo a cero.

Por tanto, dentro del plan estratégico que ha presentado el gobierno de la República de Nicaragua para mejorar la movilidad, accesibilidad y confiabilidad del transporte terrestre se prevé los siguientes aspectos:

- Aminorar costo de construcción y costo de mantenimiento de las carreteras.
- Incrementar vida útil de la infraestructura vial.
- Utilizar materia prima nacional para la construcción de caminos.
- Distribución correcta de la carga de tráfico.
- Mejorar el drenaje superficial.
- El cambio de temperatura no tiene que ser un factor incidente en la calidad de la vía.

Por consiguiente, los aspectos anteriores para mejorar la movilidad, accesibilidad y confiabilidad del transporte terrestre son cumplidos por el pavimento rígido superando en mucho al pavimento flexible, especialmente cuando se habla de una zona donde el volumen del transporte masivo de carga es alto, y por ende la utilización de pavimentos semi-rígidos o articulados que poseen un costo inicial menor a los pavimentos rígidos y flexibles no son recomendables.

En cuanto a costos de construcción ambos tipos de pavimentos (flexibles y rígidos) oscilan en montos similares, pero surge una pregunta, y si mejoráramos la competitividad de costos del pavimento rígido haciéndolo más atractivo y además simplificáramos la etapa constructiva con los equipos tradicionalmente utilizados reduciendo así el tiempo de ejecución, entonces se podría incidir en acelerar el avance constructivo de la infraestructura vial del país, sin dejar de lado los parámetros de calidad, comodidad y seguridad.

La respuesta a la interrogante anterior se tiene al alcance, la cual es impulsar e implementar la construcción de Pavimentos de Concretos Compactados con Rodillos, la utilización de este es relativamente nueva en otros países pero que ya han ejecutado proyectos de importancia considerables con muy buenos resultados. Particularmente se han implementado en presas y puertos donde el manejo de cargas es alto, por tanto en la presente tesis se hará el diseño de espesores de pavimento de CCR (Concreto Compactado con Rodillo) mediante el método que propone la PCA (Portland Cement Association) para pavimentos rígidos, considerando las variantes en ciertos parámetros de sus propiedades ingenieriles en los cuales difiere o varía con respecto el concreto convencional.

## 1.2. Antecedentes

<sup>2</sup>El Concreto Compactado con Rodillo (CCR) está constituido por agregados de tamaño máximo nominal mayores a 2 pulgadas, con contenidos de finos que pasa la malla # 200 entre 4 – 10 %, cemento con uso frecuente de bajas cuantías (60 – 150 kg/m<sup>3</sup>) y agua en menor cantidad que el concreto convencional. Este tipo de concreto se utilizó por primera vez, en el continente americano, en el estado de Ohio en el año de 1891, cuando se construyó una franja de 80 mtrs de largo y 2.4 mtrs de ancho, este fue utilizado como capa inferior de un pavimento compuesto; aunque sus inicios realmente datan en el viejo continente por los años de 1930, en Suecia.

En Yakima, Washington (E.E.U.U), se realizó el primer proyecto de camino con pavimento de CCR en el año de 1942, ejecutado por “The Seattle Pavement of the U.S. Army Corps of Engineers”. Sin embargo el mayor uso de CCR para construcción de pavimentos se dio en los años 80’, en los países del norte del continente Americano como son Canadá y Estados Unidos. El primer diseño y construcción de pavimento de CCR a una escala completa se realizó en Ft. Hood, Texas en 1984 por “Corps Of Engineers”; el área del proyecto era de 15,175 m<sup>2</sup>, con un espesor de losa de 254 mm y un esfuerzo a flexión de 5.5 MPA según los archivos.

<sup>3</sup>En Latinoamérica, países como México, Colombia, Ecuador, Venezuela y Chile, a partir de los años de 1980 comenzaron también a experimentar con tramos de pruebas, construyendo con Pavimento de Concreto Compactado con Rodillo. A pesar que Argentina no incursionó en estos años pero hoy por hoy está a la vanguardia en la utilización y desarrollo de pavimento de CCR en carreteras o de uso vial con más de 100,000 m<sup>2</sup> construido.

Actualmente en la región centroamericana países como Costa Rica, El Salvador y Honduras han ejecutado tramos de prueba de Pavimentos de Concretos Compactado con Rodillo con el objetivo de desarrollar y mejorar su técnica constructiva; tal es el caso

---

<sup>2</sup> Tecnología y Conceptos en Concreto Compactado con Rodillo. IBRACON 2010. Bernardo Martínez

<sup>3</sup> Tesis: Pavimento de Concreto Compactado con Rodillos, Universidad Nacional de Ingeniería.

de nuestro país hermano, El Salvador, en donde se ejecutó el proyecto llamado <sup>4</sup>“Paquete II Carretera San Martín – San Rafael Cedros”, el cual incluyó como parte de la estructura de pavimento, la construcción de una capa de CCR de 20 cm de espesor, en un tramo de 14.52 kilómetros de longitud y de dos carriles por sentido. Los resultados fueron satisfactorios tanto en costos, disminución en tiempo de la etapa constructiva y resistencia obtenida en la estructura de pavimento, aunque también aún existen aspectos por superar como son el espaciamiento entre juntas y su apariencia final en el rodamiento que no es la deseada.

El tramo Yalí – Condega, el cual se trabajará en la presente obra, actualmente es un camino de todo tiempo considerándolo idóneo para aplicar el método de CCR, debido a que el volumen diario de transporte de carga es alto, las condiciones climatológicas son fuertes, por tanto ocasionaría un incremento de costo en el mantenimiento de una estructura de pavimento flexible. El tipo de suelo presente en la zona es arcilloso, a pesar que ya existe un mejoramiento de suelo es necesario garantizar una mejor distribución de carga y mayor estabilidad en la estructura, por tanto es viable utilizar un pavimento rígido.

Es imprescindible que Nicaragua comience a innovar en nuevas técnicas de construcción ya que está quedando rezagada en tecnologías constructivas, el innovar es una cuestión de país (gobierno, empresa privada, recursos humanos). Aplicar el método de CCR en Nicaragua requerirá de una inversión inicial de parte de las concreteiras, esto para garantizar las especificaciones técnicas que solicita el concreto para lograr ser compactado con rodillo, el manejo para su traslado no es el mismo que el concreto convencional. En la actualidad no existen las condiciones para llevar a cabo este método pero no por eso se justifica el desconocer la metodología de diseño que es la presentada en esta obra.

---

<sup>4</sup> INFORME TECNICO. Algunas consideraciones sobre aspectos relacionados con el Concreto Compactado con Rodillo (CCR) empleado en la construcción de Pavimentos. San Salvador, El Salvador, Septiembre de 2003.

### **1.3.**

### **Justificación**

La implementación de nuevas tecnologías, que proporcionen mejores beneficios económicos y el incremento de rendimientos, conlleva al desarrollo experimental de éstas, para lograr la obtención de conocimientos teóricos - prácticos. Nicaragua no ha incursionado en el desarrollo de nuevas tecnologías o técnicas constructivas, particularmente referido a Pavimentos de Concretos Compactados con Rodillos, como la mayoría de los países de la región centroamericana, por ende, no se tiene la sapiencia necesaria para designar los pavimentos de CCR como una opción constructiva de la cual se puede disponer a corto plazo.

Por cuanto, la brecha que se tiene en relación a otros países por falta de conocimiento adquirido, la presente tesis pretende aportar para ir reduciendo esa disparidad, aplicando la metodología teórica necesaria para el diseño de espesores de Pavimentos de Concretos Compactados con Rodillos (CCR). Para ello se utilizará la norma internacional de la Asociación de Cemento Portland (PCA) adaptada a este tipo de Pavimento de CCR.

Cabe destacar que las normas de la AASTHO y la norma tradicional de la PCA para pavimentos rígidos son específicamente para concretos convencionales, por tanto, no deberían de aplicarse para Concretos Compactados con Rodillos. El método de la PCA considera el comportamiento del concreto según sus propiedades y esfuerzos de una manera más teórica en comparación con el método de la AASTHO que es empírico-mecanicista, la cual limita el diseño a determinados parámetros que fueron considerados en los estudios experimentales, por tanto es más conveniente utilizar la metodología propuesta por la Asociación del Cemento Portland, la cual ya ha realizado estudios a escala natural de CCR, donde también propone tomar en cuenta los resultados obtenidos de este proceso experimental a la hora de diseño de espesores.



## **1.4. OBJETIVOS**

### **1.5. Objetivo General**

- Aplicar y desarrollar la metodología correspondiente de Diseño de Espesores para Pavimentos de Concretos Compactados con Rodillos en el tramo de carretera “San Sebastián de Yalí – Condega”.

### **1.6. Objetivos Específicos**

- Recopilar información de TPDA, tipo de suelo y capacidad de soporte de este, entre otra información requerida para llevar a cabo el diseño de espesores de Pavimento de CCR.
- Diseñar espesores de Pavimento de Concreto Compactado con Rodillo aplicando el método propuesto por la PCA (Portland Cement Association) en su “*Guía para Pavimentos Compactados con Rodillo*”, esgrimiendo información obtenida de los estudios de factibilidad y diseño del tramo de carretera San Sebastián de Yalí-Condega para este fin.
- Emplear Software que aplique la metodología de elementos finitos para la obtención de esfuerzos principales máximos y mínimos en los diferentes puntos críticos de la losa propuesta para la comparación y análisis de resultados.
- Proporcionar a los estudiantes, docentes y profesionales interesados en el tema la metodología y utilización correcta de la norma correspondiente para el diseño de Espesores de Pavimentos Compactados con Rodillos.

## **CAPITULO 2**

### **Pavimentos de Concreto Compactados con Rodillos – CCR.**

---

#### **2.1. Generalidades.**

<sup>5</sup>El Concreto Compactado con Rodillo (CCR), es una mezcla de concreto de cemento Portland capaz de soportar en su estado no endurecido un rodillo mientras éste es compactado, el espesor para uso de pavimentos comprende entre capas de 25 cm de espesor compactado, así define al CCR el Instituto Americano de Concreto (ACI 116R, 2012). Asimismo, el CCR para pavimentos puede ser descrito más ampliamente como: <sup>6</sup>“Una mezcla relativamente rígida de agregados (usualmente de tamaño máximo no mayor que 3/4 plg. – 19 mm), pero con una relación agua/cemento muy reducida que lo hace muy seco, sin revenimiento en el cono de Abrams, que hace que no sea posible colocarlo en obra mediante vibración interna. Esta propiedad hace que difiera un poco en cuanto a su diseño y método de colocación respecto de las mezclas convencionales, ya que se emplean rodillos compactadores o neumáticos para alcanzar las densidades especificadas. No requiere formaletas, no requiere dovelas o refuerzo y no ocupa acabado o texturizado.

Las resistencias alcanzadas con los concretos secos compactados son similares a las alcanzadas con los concretos tradicionales, pero el comportamiento del material como base e inclusive como pavimento mismo, es superior debido a que la separación entre juntas de retracción puede estar entre 15 y 20 m.

---

<sup>5</sup> ACI (American Concrete Institute) Manual of Concrete Practice 2012, Parte 3

<sup>6</sup> Instituto Nicaragüense del Cemento y el Concreto (INSYC), Boletín Técnico/Junio 2012/Numero 35

Cuando el concreto compactado con rodillo es usado como una capa de rodadura, la resistencia a compresión mínima especificada es de 4,000 psi (27.6Mpa)” (ACI 325.10R-95, 2012).

El agua en este tipo de mezcla (CCR) constituye el 5% del peso seco de los materiales, la relación agua-cemento oscila entre 0.35 y 0.45 (Vidaud I y E, 2012), esto con el propósito de lograr una mayor adherencia de los elementos cementantes con los agregados al momento de ser compactados y para optimizar el proceso de fraguado, con esto se evita las pérdidas de resistencia por las variaciones de la humedad.

El uso de CCR está adquiriendo un mayor auge como una metodología constructiva viable en estos últimos años, implementándose principalmente en construcción como: calles urbanas, vías principales y secundarias, aeropuertos, puertos, áreas de estacionamiento y patios de maniobras, presas, pavimentos en terminales portuarias y carreteras; el presente documento se enfocará principalmente en esta última área antes mencionada de la ingeniería civil.

## **2.2. Materiales Constituyentes**

### **2.2.1. Agregados**

Los agregados generalmente ocupan entre el 75% y el 85% del volumen de CCR, el tamaño máximo de agregado deseado oscila entre 40 y 20 mm, de ahí su gran importancia en las propiedades del material tanto en estado fresco como endurecido. Estos determinan la capacidad del trabajo requerida, la densidad especificada en el campo bajo compactación vibratoria, la resistencia a la compresión y a la flexión, propiedades térmicas y la durabilidad.

En cuanto a la procedencia de los agregados, se prefieren los obtenidos por trituración a los adquiridos en explotación aluviales, debido a su menor tendencia a segregarse, aun cuando son difíciles de compactar. Se recomienda que al menos 2/3 partes del volumen de agregados sean triturados mecánicamente, para lograr una capacidad de soporte alta, suficiente para que los equipos de compactación inicien su labor inmediatamente se

descargue el concreto en el piso. Esta capacidad portante se puede evaluar sometiendo probetas, cuya densidad sea como mínimo el 97% del ensayo Próctor, al ensayo de CBR sin sobrecarga ni saturación; el resultado debe ser superior a 65%.

Se recomienda que la granulometría de los agregados debe ser continua, densa y tal que, unida al cemento presente una cantidad de finos suficientes para lograr una buena compactación.

### **2.2.2. Cemento**

El cemento a utilizar puede ser cemento Portland de tipo I o tipo II son adecuados para producir concreto compactado con Rodillo. Por motivos económicos y técnicos cada día se utilizan más los cementos mezclados o una combinación de cemento hidráulico y puzolana hasta llegar a proporciones del 50%. Una discusión detallada de la selección y uso de cemento hidráulicos y materiales cementantes complementarios se pueden encontrar en ACI 225R.

El material cementante se presenta en la mezcla en el rango del 10% al 17% en peso seco, aproximadamente corresponden entre 208 a 356 kg/m<sup>3</sup>. Para determinar el contenido de cemento óptimo, se realizan pruebas de resistencia a especímenes cilíndricos utilizando un roto-martillo (ASTM C 1435). Cada espécimen se moldea con el contenido de cemento a evaluar con su correspondiente contenido de humedad óptima, obtenidos de las pruebas de Próctor Modificado.

En una investigación particular realizada en España para obtener resistencias en una mezcla combinada de CCR con las proporciones de 47.5% de Clinker portland, 2.5% de yeso y 50% de ceniza volante, se obtuvieron los resultados que se muestran en la siguiente tabla, pudiéndonos servir como índice para saber las resistencias que se pueden alcanzar usando cemento producido con adiciones:

**1.- RESISTENCIA DEL CONCRETO COMPACTADO CON RODILLO SEGÚN EL  
CONTENIDO DE CEMENTO**

**TABLA N° 1**

<b>CONTENIDO DE CEMENTO ADICIONADO</b>	<b>RESISTENCIA EN EL ENSAYO (kg/cm<sup>2</sup>)</b>		
	<b>A 7 días</b>	<b>A 28 días</b>	<b>A 90 días</b>
<b>% en Peso</b>			
<b>10</b>	11,2	18,4	22,4
<b>11</b>	13,3	24,5	30,6
<b>12</b>	19,4	29,6	35,7
<b>13</b>	23,5	35,7	46,9
<b>14</b>	26,5	36,7	50,0
<b>15</b>	27,5	36,7	53,0

FUENTE: Notas Técnicas, Concreto Compactado con Rodillo, Instituto Colombiano de Productores de Cemento (ICPC)

**2.2.3. Agua**

Los requerimientos del agua para la mezcla de concreto convencional son los mismos que se exigen para la mezcla de Concreto Compactado con Rodillo.

El agua debe estar limpia, clara y libre de ácidos, sales, álcalis o materiales orgánicos que pueden ser perjudiciales para la calidad del concreto.

Debe estar libre de sustancias perjudiciales a la hidratación del cemento, por lo que es recomendado el uso de aguas potables.



En la tabla N° 2 se muestran los límites permitidos de las diferentes impurezas en el agua de mezclado.

### IMPUREZAS PERMISIBLES EN EL AGUA.

TABLA N° 2.

Impurezas	Límites (ppm)	Efectos en el concreto
Algas	2000	Inclusión de aire
Carbonatos	1000	Reducción del tiempo de fraguado
Sulfato de sodio	10000	Alta resistencia inicial; baja a edades largas
Sulfato de magnesio	40000	Alta resistencia inicial; baja a edades largas
Cloruros	20000	Reducción del tiempo de fraguado; alta resistencia inicial; baja a edades largas
Boratos	500	Retardo de fraguado
Azúcar	500	Retardo de fraguado

Fuente: Guía de clases de Tecnología del Concreto "Agua de Mezclado". UES 2011

El agua no potable puede ser considerada como una fuente para una parte o la totalidad del agua de mezclado, siempre y cuando en el diseño las pruebas realizadas indiquen que el uso de dicha agua no tendrá ningún efecto perjudicial sobre la fuerza y las propiedades de durabilidad de la obra de CCR.

El porcentaje de agua por metro cúbico utilizado en CCR varía entre 4 % y 7 % del peso de los materiales secos, es decir, aproximadamente un 70 % menos del agua que normalmente se utiliza para fabricar un concreto común.

Al realizar el control de la humedad de los agregados y de la mezcla es de gran importancia, pues los CCR son muy sensibles a la variación del contenido de agua. Su falta aumenta el riesgo de segregación y dificulta la compactación y el acabado

superficial, mientras que su exceso produce inestabilidad de la mezcla durante la compactación y disminución de la resistencia mecánica del material.

Requerimientos de agua real necesitan ser establecidos en pruebas de laboratorio y verificado por pruebas de campo. Esto debe resultar en relaciones agua-material cementante (a/cm) en el rango de 0.25 a 0.40 o mayor.

Para determinar el contenido de humedad se realizan pruebas que involucran vibración a la mezcla fresca en una tabla vibratoria (ASTM C1170), o compactación por martillo siguiendo los procedimientos de ASTM D1557 o Próctor Modificado.

Las pruebas de compresión a especímenes obtenidos in situ y los resultados de resistencias obtenidos no varían en más del 10% entre uno y otro espécimen, entonces se puede aceptar la fuente de agua en estudio.

#### **2.2.4. Aditivos**

El uso de aditivo está orientado hacia los retardadores de fraguado para prolongar y garantizar que se dispondrá de tiempo suficiente para lograr la compactación exigida.

La capacidad de un aditivo reductor de agua para reducir los requerimientos de agua para una mezcla de CCR, parece depender en cierta medida de la cantidad y el tipo de agregado más fino que el tamiz No 200 (75 micras). Algunos productores han encontrado que es más barato aumentar el contenido de cemento en lugar de utilizar aditivos reductores de agua.

Se recomienda, siempre que se esté considerando algún tipo de mezcla que las pruebas de laboratorio y de campo deben de llevarse a cabo para determinar la eficacia y las tasas de dosificación adecuada.

## **CAPITULO 3**

### **PROPIEDADES DE COMPORTAMIENTOS, ESFUERZOS Y DEFLEXIONES**

---

#### **3.1. PROPIEDADES INGENIERILES**

Las propiedades más significativas del concreto compactado con rodillo, son las mismas que para el concreto convencional.

El CCR tiene propiedades características tanto para su estado fresco, como endurecido. Con su estado fresco se relaciona, la trabajabilidad y la densidad – contenido de humedad; con su estado endurecido se relaciona la resistencia a la compresión, que es la característica más representativa del concreto, otras también importantes son, el Modulo de Elasticidad, la resistencia a la tracción y al corte, la permeabilidad, la durabilidad, etc. Aplicado en la pavimentación, existen dos propiedades que son predominantes la resistencia a los esfuerzos por flexión y la resistencia a la fatiga, debido a su incidencia en el espesor del pavimento.

#### **3.2. Resistencia a la Compresión.**

Ensayos de resistencia a la compresión son desarrollados en la fase de diseño para determinar los requerimientos de las proporciones de mezclas y optimizar la combinación de los materiales cementantes y agregados. La resistencia a la compresión es utilizada para satisfacer los requerimientos de cargas de diseño y también como indicador de otras propiedades tales como la durabilidad. Durante la construcción, los ensayos de resistencia a la compresión son usados para confirmar las propiedades de diseño como un instrumento para evaluar la variabilidad de la mezcla.

La resistencia a la compresión es normalmente requerida debido a su facilidad de determinación y que muchas otras propiedades están directamente ligadas a ella.

La resistencia a la compresión del CCR se incrementa con una reducción en el contenido de agua, mientras que esté completamente compactado. La máxima resistencia a la compresión para una mezcla determinada se obtiene con el óptimo contenido de agua acorde con el esfuerzo de compactación dado. Los contenidos de agua menores que el óptimo producen resistencias a la compresión menores, indicando ello que la presencia de vacíos en la mezcla tiene un efecto negativo mayor sobre la resistencia que el efecto positivo de reducción de agua.

El concreto compactado con rodillo puede alcanzar alta resistencia a la compresión a los 28 días, que oscilan entre 280 hasta 420 kg/cm<sup>2</sup> (de 4,000 hasta 6,000 psi), ésta es inversamente proporcional a la relación agua/cemento de la mezcla la cual puede contener entre 4 a 7 sacos de cemento por metro cúbico. Las altas resistencias se logran solo garantizando una muy buena compactación con el proceso constructivo correcto, y se deben realizar rigurosos controles de calidad a como lo refiere la prueba ASTM C1176 para obtener el esfuerzo a compresión requerido mediante especímenes de concreto.

Como se ha mencionado con anterioridad unos de los países precursores, en el continente Americano, de esta metodología constructiva ha sido Canadá, por lo cual es conveniente aprender de sus experiencias y resultados obtenidos en determinados proyectos. Por tanto, se muestra en la siguiente tabla los esfuerzos a compresión obtenidos en proyectos ejecutados por este país, luego de estar varios años expuestos a cargas de tráfico:

**RESISTENCIA A LAS COMPRESION DEL CCR EN EL TIEMPO EXPUESTO A  
CARGAS DE TRÁFICO**

**TABLA N° 3.**

<b>Proyecto</b>	<b>Edad del núcleo en años</b>	<b>Porcentaje de Contenido de Cemento</b>	<b>Resistencia a la Compresión, PSI (MPa)</b>
<b>Caycuse log sort yard</b>	4	13,8	4,210 (29.0)
<b>Caycuse log sort yard</b>	8	13	5,880 (40.5)
<b>Lynterm container port</b>	3	8	4,690 (32.3)
<b>Fraser mills log sort yard</b>	1	13	4,700 (32.4)
<b>Bullmoose coal mine</b>	1	14	2,200 (15.2)
<b>Frase surrey dock</b>	1	12	4,570 (31.5)

FUENTE: ACI Manual of Concrete Practice 2012, Volumen III

### **3.3. Esfuerzo de flexión o de ruptura.**

El concreto compactado con rodillo tiene un comportamiento similar al concreto convencional esto según un estudio patrocinado por la PCA en donde se evaluaron las propiedades ingenieriles del CCR, en un proyecto a escala natural.

Por consiguiente, la buena correlación que existe entre la Resistencia a Tracción Indirecta y el Módulo de Ruptura en el concreto convencional se refleja también en el CCR, donde ambas mezclas reflejan una tendencia lineal de estos esfuerzos, según estudios realizados con anterioridad.

Así también, podríamos considerar la fórmula recomendada por la Asociación de Cemento Portland (PCA), para el cálculo del módulo de Ruptura, aplicable al CCR la cual está expresada de la siguiente manera:

$$M = C(f)^{1/2}$$

Fuente: Guide for Roller-Compacted Concrete Pavements, PCA.

Dónde:

$$M : \text{e. e. } M \quad d \quad R \quad o \quad E \quad a \quad f \quad \text{ò} \quad n, p \quad (M).$$

$$f : \text{e. e. } E \quad o \quad R \quad a \quad l \quad C \quad , p \quad (M).$$

$$C : \text{e. u. } c \quad e \quad 9 \text{ y } 11 \text{ e. } s \quad e \quad t \quad i \quad d \quad m \quad u.$$

En cuanto, el esfuerzo a flexión su oscilación se vislumbra generalmente de 35 kg/cm<sup>2</sup> hasta 70 kg/cm<sup>2</sup> (es decir de 500 hasta 1,000 PSI)

### 3.4. Módulo de Elasticidad.

El módulo de elasticidad está definido como la relación del esfuerzo normal a su correspondiente deformación para esfuerzos de tensión o compresión, por debajo del límite elástico del material.

El módulo de elasticidad presente en el CCR es igual o mayor que el producido en un concreto convencional, esto según el cuerpo de ingenieros de Estados Unidos, los cuales también han reflejado en sus estudios que esta propiedad promedia un valor de 280,000 kg/cm<sup>2</sup> y un Módulo de Poisson de 0.15. No obstante, el módulo de elasticidad está determinado por la siguiente ecuación:

$$E = C(f)^{1/2}$$

Fuente: Guide for Roller-Compacted Concrete Pavements, PCA.

Dónde:

$$E : \text{e. e. } M \quad d \quad E \quad , p \quad (M).$$

$$f : \text{e. e. } E \quad o \quad R \quad a \quad l \quad C \quad , p \quad (M).$$

C: e. u c e 59,000 y 67,000  
e. s ú n e t i d m u .

Los principales factores que inciden en las propiedades elásticas del concreto son:

La edad, las características del agregado, la relación agua/cemento y la calidad de la pasta. El cumplimiento de las normas internacionales de calidad son importantes para no afectar negativamente las propiedades ingenieriles de la mezcla.

### 3.5. Retracción

La retracción presente en el concreto compactado con rodillo es inferior a la que se presenta en el concreto convencional debido al menor contenido de agua y a un mayor acomodo de los agregados que restringen el movimiento de retracción.

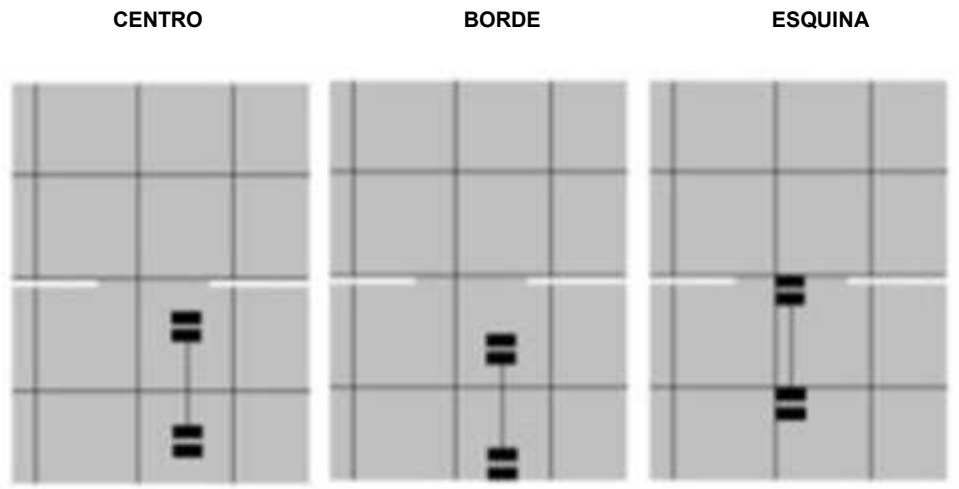
Para una resistencia dada, un concreto de baja trabajabilidad contiene más agregados que una mezcla de alta trabajabilidad (refiriéndome al Concreto Compactado con Rodillo y al Concreto Convencional respectivamente) para un tamaño máximo dado y por lo tanto menos tracción.

La incidencia que tiene la relación agua/cemento y del contenido de agregados con respecto a la retracción es tal que para una relación a/c de 0.35, al pasar del 70% al 80% de contenido de agregado por volumen la retracción se reduce a casi la mitad.

### 3.6. Comportamiento a la Fatiga

Como el concreto convencional y otros materiales de construcción, el CCR es sujeto a los efectos de fatiga. La falla por fatiga es definida como la ruptura del material después de cargas aplicadas continuamente y repetidas que causan esfuerzos menores del esfuerzo del material. Cuando se da un análisis por fatiga, este se basa en cálculo de esfuerzos por cargas en los bordes de las losas a medio camino entre las losas transversales.

*Figura N°1: Ubicaciones de carga en losas*



El análisis por fatiga controla los diseños de pavimentos delgados, para bajo tránsito independientemente del tipo de transferencia de carga en las juntas transversales.

La magnitud de los esfuerzos críticos se reduce si las bermas se anclan al pavimento. Se considera que la resistencia a fatiga no consumida por una carga queda disponible para ser consumida por las repeticiones de otras cargas (Ley de Miner).

Resultados de ensayos de fatiga sobre vigas de mezclas de CCR, indican que la fatiga de CCR es similar a la del concreto convencional.

Como es sabida la Asociación de Cemento Portland ha realizado diversos estudios con Concreto Compactado con Rodillo particularmente para ver el comportamiento de sus propiedades ingenieriles, en donde uno de sus alcances fue el determinar las características de fatiga por flexión.



<sup>7</sup>Las pruebas de fatigas por flexión se realizaron en especímenes de viga obtenidos en un tramo de prueba a escala natural, donde luego se aplicó una regresión lineal para obtener la curva de fatiga para los datos de prueba de las cuatro mezclas diferentes de CCR que se usaron.

Se compararon luego los resultados de las pruebas de fatiga de la mezcla de CCR con los resultados de la prueba de fatiga para el concreto convencional dirigidas por Murdoch y Kesler y por Ballinger.

Los resultados finales obtenidos del estudio fue el desarrollo de una curva de fatiga para el diseño de CCR utilizando un grado similar de conservadurismo que el que se usó para desarrollar la curva de fatiga de diseño del concreto convencional. En la siguiente tabla se muestra información para la curva de fatiga para diseño:

**TABLA N° 4.**

<b>RELACION DE ESFUERZO Y REPETICIONES DE CARGA ADMISIBLES PARA DISEÑO DE PAVIMENTOS DE CCR</b>			
<b>Relación de esfuerzos</b>	<b>Repeticiones Admisibles</b>	<b>Relación de Esfuerzos</b>	<b>Repeticiones Admisibles</b>
<b>0.40</b>	600,000	<b>0.56</b>	9,700
<b>0.41</b>	465,000	<b>0.57</b>	7,500
<b>0.42</b>	360,000	<b>0.58</b>	5,800
<b>0.43</b>	280,000	<b>0.59</b>	4,500
<b>0.44</b>	210,000	<b>0.60</b>	3,500
<b>0.45</b>	165,000	<b>0.61</b>	2,700
<b>0.46</b>	130,000	<b>0.62</b>	2,100
<b>0.47</b>	100,000	<b>0.63</b>	1,600
<b>0.48</b>	76,000	<b>0.64</b>	1,200
<b>0.49</b>	59,000	<b>0.65</b>	950
<b>0.50</b>	46,000	<b>0.66</b>	740
<b>0.51</b>	35,000	<b>0.67</b>	570
<b>0.52</b>	27,000	<b>0.68</b>	440
<b>0.53</b>	21,000	<b>0.69</b>	340

<sup>7</sup> Concreto Compactado con Rodillo "CCR", Universidad de Sonora, Capítulo 5.

<b>0.54</b>	16,000	<b>0.70</b>	260
<b>0.55</b>	12,000		

FUENTE: Concreto Compactado con Rodillo "CCR", Universidad de Sonora, Capítulo 5. Pag. 38

Notas:

- La relación de esfuerzos se refiere al esfuerzo en el pavimento debido a la carga por rueda dividido entre la resistencia a la flexión ( $M_r$ ) a los 28 días de edad.
- Para relaciones de esfuerzos menores a 0.40 las repeticiones serán ilimitadas.
- Ecuación de la fatiga de diseño para CCR:

$$L(N) = 1.2 - 1.1(S)$$

Donde:

N= Repeticiones de Cargas Admisibles

SR= Relación de Esfuerzos (Stress ratio por sus siglas en Ingles).

### 3.7. Comportamiento a la erosión

La resistencia a la erosión del CCR es proporcional a la resistencia a la compresión y a la abrasión de los agregados empleados en la mezcla. El CCR ha demostrado buen comportamiento a la erosión y a la abrasión, tanto en los laboratorios como en obras. Los pavimentos que soportan cargas pesadas no han presentado desgastes apreciables por el tráfico o abrasión industrial bajo condiciones severas.

Los puntos a considerar en el análisis por erosión son los siguientes:

- Se considera que el pavimento falla por el bombeo, por erosión del soporte y por escalamiento de las juntas.

- La deflexión más crítica ocurre en las esquinas de la losa, cuando la carga está situada en la junta en cercanías de la esquina.
- La deflexión en la esquina de la losa se reduce si la berma está anclada al pavimento o si la losa es suficientemente ancha como para que las llantas circulen lejos de los bordes de las llantas.
- Este criterio es necesario, ya que evita fallas del pavimento, como succión de finos de la capa de apoyo que producen a su vez desnivel entre losas y destrucción de hombros, siendo situaciones independientes de la fatiga.

### **3.8. Comportamiento a la Temperatura**

El medio ambiente puede afectar el comportamiento del pavimento en varias formas. Los cambios de temperatura y humedad pueden tener cierto efecto sobre la resistencia, durabilidad y capacidad de carga del pavimento y de los suelos de la subrasante. Asimismo, estos gradientes deforman las losas del pavimento produciéndole alabeos que modifican continuamente las condiciones de apoyo y de contorno. Con propiedad puede decirse que el pavimento de concreto es una estructura viva que se mueve al compás de la naturaleza.

En los CCR al igual que en cualquier otro pavimento de concreto estos cambios de temperatura ocasionan importantes efectos en el comportamiento de la losa, por ejemplo: la infiltración de agua a través de la superficie, juntas, grietas, o como agua subterránea proveniente de un alto nivel freático, acuíferos interrumpidos y manantiales localizados contribuyen al desarrollo de fallas en los pavimentos de concretos como son: inestabilidad de la subrasante, bombeo con la consecuente pérdida de soporte y deterioro del concreto debido a fisuras de durabilidad .

El agua libre en la interface subrasante del pavimento es la responsable de muchos problemas. Cerdegreen demostró que las cargas dinámicas producen incrementos más importantes de la presión de poros justo en el momento del pesaje de la carga y en consecuencia, hay una reducción notable de la capacidad de carga.

En adición al efecto perjudicial del agua, las losas de concreto están sometidas al alabeo y curvado. El alabeo es la deformación cóncava hacia arriba de la losa debido a las variaciones de su contenido de humedad con la profundidad.

El efecto del alabeo es doble pérdida del soporte a lo largo de los bordes de la losa y restricción de los esfuerzos a la compresión en el fondo de la losa.

El curvado se refiere al comportamiento de la losa debido a las variaciones de temperatura. Durante el día, cuando la cara superior está más caliente que la parte inferior, se desarrollan esfuerzos restringidos de tensión en el fondo de la losa.

Durante la noche, la distribución de temperatura es a la inversa y los esfuerzos restringidos de tensión se desarrollan en la superficie de la losa.

### **3.9. Durabilidad**

La durabilidad del CCR es especialmente importante si el material es expuesto al tiempo o a fuerzas hidráulicas severas. El CCR como el concreto en masa convencional, está sujeto a un potencial deterioro debido a los efectos de abrasión/erosión, congelamiento/deshielo y otros factores como reacción álcali /sílice y ataque a los sulfatos.

<sup>8</sup>La norma ASTM C666 es una prueba útil para evaluar la durabilidad del concreto convencional pero la aplicación directa al CCR no está claramente establecida, por tanto, el mejor indicador en la actualidad, es el desempeño que ha tenido el concreto compactado con rodillo en el campo, el cual ha tenido un muy buen comportamiento.

<sup>9</sup>Esto según un estudio realizado por estudiantes de Estados Unidos y Canadá, a 34 estructuras de pavimentos en condiciones climatológicas variables y con un rango de edades de 3 a 20 años.

---

<sup>8</sup> Tesis: Concreto Compactado con Rodillo como Alternativa de Pavimentación para la Red vial de El Salvador, Universidad de El Salvador.

<sup>9</sup> Guide for Roller-Compacted Concrete Pavements, National Concrete Pavement Technology Center, August 2010.

## CAPITULO 4

---

### 4.1. MÓDULO DE REACCIÓN DE LA SUB-RASANTE (VALOR K).

El concepto del módulo de reacción  $k$ , fue introducido por Winkler y posteriormente modelado por Westergaard en 1920, este modelo se presenta en las siguientes condiciones:

1. Las losas de concreto que están en equilibrio y se comportan como un sólido homogéneo elástico.
2. La reacción del suelo es vertical a la deflexión de la losa.
3. La reacción del suelo por unidad de área y en cualquier punto es igual al producto de la constante  $k$  (Módulo de reacción de la subrasante) por la deflexión de la losa en dicho punto.
4. El espesor de la losa es uniforme.
5. Cuando se está estudiando el caso de una carga aplicada en una esquina de la losa se considera una distribución circular, tangencial a los bordes de la losa que conforman la esquina. Cuando la carga está aplicada se toma como área de contacto un semicírculo cuyo diámetro con el borde de la losa.

El módulo de reacción “ $K$ ” de Westergaard de la Sub – Rasante es obtenida mediante la prueba de placa ASTM D1195 y D1196. En definición, el módulo de reacción de Westergaard determina la capacidad portante del suelo existente en donde se asentará la estructura de pavimento.

Es conveniente saber que el contar con una Sub-Base nos permite incrementar el valor de “K” que tendrá que usarse en el diseño de espesores. Si la Sub-Base está constituida con material granular no tratada o mejorada la variación de dicho valor no será muy significativa, en cambio, al tener una Sub-Base tratada con cemento se estaría aportando una mayor capacidad de carga por ende, el valor “K” tendría un incremento considerable. Comúnmente las Sub-Base mejoradas con material cementantes son muy empleadas en zonas donde existe alta circulación de tráfico pesado.

El módulo de reacción k se obtiene mediante la siguiente formula:

$$k = p/W$$

En donde:

P = presión aplicada a la capa considerada (B, SB, SR)

W = Deformación.

## **CAPITULO 5**

### **ESFUERZOS Y DEFLEXIONES**

---

#### **5.1. ESFUERZOS Y DEFLEXIONES EN PAVIMENTOS RÍGIDOS.**

Una estructura vial, está sometida a diario a los diferentes esfuerzos y deformaciones tales como son: los esfuerzos que sufren en los procesos constructivos, los ocasionados debido a las altas temperaturas y los ocurridos por el paso vehicular.

#### **5.2. Esfuerzos constructivos**

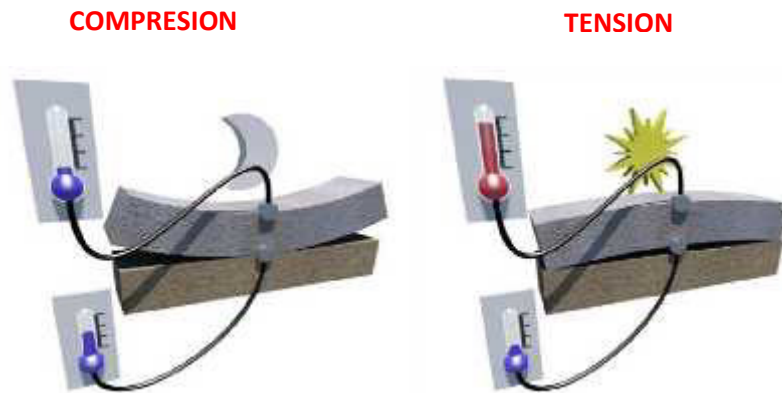
Estos esfuerzos se dan por las cargas aplicadas a la estructura de pavimento durante el proceso de construcción:

- Cuando no se da una buena colocación y compactación del concreto el efecto en la losa podría manifestarse por medio de fisuras longitudinales a temprana edad.
- La selección de los agregados es muy importante porque son los que le van a dar buena trabajabilidad, acabado al concreto y evitara la segregación del material.
- El Diseño, el porcentaje de humedad, el curado y el Corte y sellado de juntas, son factores también importante a considerar para así aminorar los esfuerzos que ocasionan el agrietamiento en el pavimento.

#### **5.3. Esfuerzos por temperatura**

El aumento de la temperatura adiabática, es la mayor preocupación en masas de concretos convencionales y de concretos compactados con rodillos.

*Figura N°2: Deflexión de losa de concreto por temperatura*



Los cambios en las temperatura ambiente proporcionan un gradiente térmico en el espesor de la losa.

El peso propio de la losa y su contacto con la superficie de apoyo restringen el movimiento generando esfuerzos.

Por otro lado las propiedades termales de las mezclas son gobernadas por propiedades termales de los constituyentes. Aunque los valores para concretos convencionales y CCR son similares, los valores reales medidos pueden variar significativamente dependiendo del tipo y contenido de agregados, cemento u puzolana.

Las mezclas de CCR con bajo contenido de material cementante tendrán menor aumento de temperatura que las mezclas normales de concretos masivos. También las puzolanas pueden reducir la velocidad de aumento de temperatura en edades tempranas.

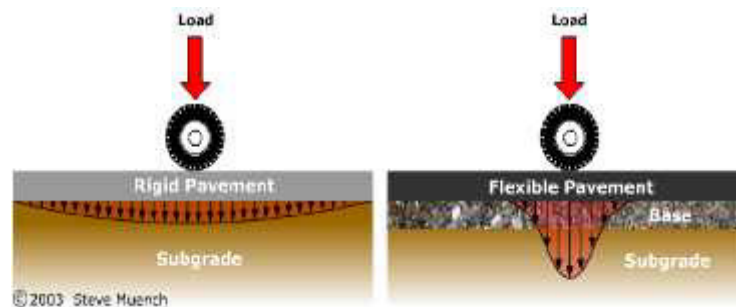
#### **5.4. Esfuerzos por tráfico**

Por lo regular el tránsito es el factor más importante a considerar del diseño de pavimentos. Su importancia aumenta con el número de vehículos pesados que circulen,



generando un número importante de repeticiones de cargas al pavimento, cuyo efecto se manifiesta en mayores esfuerzos y deformaciones, fatiga del concreto y erosión de la sub base.

*Figura N°3: Esquema de Esfuerzos resultantes en pavimentos rígidos y flexibles*



## **CAPITULO 6**

### **CARACTERÍSTICAS Y VENTAJAS DE LOS PAVIMENTOS CCR**

---

#### **6.1. Características Restrictivas y Ventajas de los Pavimentos Compactados con Rodillos.**

El Concreto Compactado con Rodillo no es un sistema constructivo perfecto, por ello, los contratistas y consultores deben de estar claros de las limitaciones y desafíos de este tipo de concretos tales como:

- El perfil y la suavidad del CCR normalmente no son los deseables para pavimentos que transportan tráfico de alta velocidad.
- La cantidad de CCR que se puede mezclar en un mezclador de tránsito o camión de concreto premezclado suele ser inferior a la del concreto convencional, esto es debido a la resequedad de la mezcla.
- El colado debe darse en transcurso de una hora para asegurar la buena adherencia cuando existan capas múltiples o en losas adyacentes (a menos que se tenga considerado realizar una junta fría).
- Los bordes de este tipo de pavimentos son más difíciles de compactar, por lo que la mayoría de las especificaciones exigen un 96% de densidad de la prueba del Próctor Modificado en cambio en juntas frías se requiere un 98%. La historia ha demostrado que las juntas frías debidamente preparadas y consolidadas funcionan muy bien.

- Debido al bajo contenido de agua que posee la mezcla, en climas calientes como el nuestro se requiere una vigilancia extra para minimizar la pérdida de agua por evaporación.

En cuanto a las ventajas del CCR tenemos que el beneficio primario podríamos considerar que es la velocidad constructiva de éste y la rentabilidad con respecto a concretos convencionales y a pavimentos asfálticos de capas múltiples.

Otros beneficios que ofrece el Concreto Compactado con Rodillo son los siguientes:

1. Debido al bajo contenido de pasta en el CCR los resultados obtenidos se traducen en una menor retracción del concreto y la reducción del agrietamiento por tensiones relacionadas con la contracción.
2. El CCR puede ser diseñado para tener una alta flexión, compresión y resistencia al corte, lo que le permite soportar cargas pesadas, repetitivas sin fallos, como en la industria pesada, la minería y las aplicaciones militares y para resistir impactos y cargas muy concentradas.
3. Gracias a su baja permeabilidad la mezcla de CCR proporciona una excelente durabilidad y resistencia a los ataques químicos.
4. El CCR es resistente a la abrasión, similar al concreto convencional, incluso con cargas pesadas y de gran volumen de tráfico.
5. Se puede abrir el tráfico a vehículos ligeros que transiten a baja velocidad sin causar ningún daño, poco tiempo después de haber finalizado la compactación del concreto.
6. Cuando se utiliza como una capa de Base con adoquines de alta densidad y en dependencia de la mezcla puede colocarse en capas de hasta 25 cm.
7. El Concreto Compactado con Rodillo tiene un Índice de Reflectancia Solar (SRI, siglas en Ingles) superior al 29 del mínimo requerido por el Liderazgo en Energía y Diseño Ambiental (LEED, siglas en Ingles).

8. Resumiendo, sus principales ventajas son: Fácil preparación, Alto volumen de producción, Fácil colocación con mínima mano de obra, alta resistencia y durabilidad, desempeño comprobado.

## **6.2. Normas Internacionales para el Diseño de Espesores de Pavimentos Rígidos Convencionales y de CCR.**

Los métodos más ampliamente utilizados a nivel mundial para el diseño de espesores de pavimentos rígidos son el de la American Association of State Highways and Transportation Officials (AASHTO) y el de la Portland Cement Association (PCA), por lo cual, abordaremos aspectos generales de cada uno de ellos.

### **6.3. Método AASHTO**

El método de diseño de espesores de pavimentos rígidos está basado en los resultados obtenidos de la prueba de carreteras concebida y promovida gracias a la organización que ahora conocemos como AASHTO, para estudiar el comportamiento de estructuras de pavimento de espesores conocidos, bajo cargas móviles de magnitudes y frecuencias conocidas y bajo el efecto del medio ambiente en secciones conocidas de pavimentos rígidos y flexibles. La planeación empezó en 1951, la construcción del proyecto comenzó en 1956 muy cerca de Ottawa, Illinois. El tráfico controlado de la prueba se aplicó de octubre de 1958 a noviembre de 1960 y el método estuvo listo para 1961.

El objetivo principal de las pruebas consistía en determinar relaciones significativas entre el comportamiento de varias secciones de pavimento y las cargas aplicadas sobre ellas, o bien para determinar las relaciones significativas entre un número de repeticiones de ejes con cargas, de diferente magnitud y disposición, y el comportamiento de diferentes espesores de pavimentos, conformados con bases y sub-bases, colocados en suelos de características conocidas.

En total se examinaron 368 secciones de pavimento rígido y 468 secciones de pavimento flexible. Las mediciones físicas de las secciones de prueba se transfirieron a fórmulas

que podían dar nuevamente valores numéricos de capacidad de servicio, estos valores graficados contra las aplicaciones de carga forman una historia de comportamiento para cada sección de prueba que permiten la evaluación de cada uno de los diversos diseños.

<sup>10</sup>Aproximadamente después de un año de terminar la prueba AASHO (inicialmente así conocida) para 1961 salió publicada la primer "Guía AASHO para Diseño de Pavimentos Rígidos y Flexibles". Posteriormente para 1972 se realizó una revisión y se publicó como la "Guía AASHTO para Diseño de Estructuras de Pavimento - 1972". Para 1981 se hizo una revisión al Capítulo III, correspondiente al Diseño de Pavimentos de Concreto con Cemento Portland. Para 1986 se publicó una revisión de la "Guía para el Diseño de Estructuras de Pavimento". En 1993 se realizó una Revisión del Diseño de Sobre-carpetas de pavimento. Para 1998 se publicó un método alternativo para diseño de pavimentos, que corresponde a un "Suplemento a la guía de diseño de estructuras de pavimento".

#### **6.4. Método PCA**

El método de diseño de la Portland Cement Association es exclusivamente un método de diseño desarrollado para pavimentos de concreto. Teniendo como base el conocimiento de varias teorías de pavimentos como Westergaard, Picket and Ray así como de elementos finitos, también la experiencia en el comportamiento de varias pruebas e investigaciones como la Arlington Test y diversos proyectos de la misma PCA. Derivado de lo anterior se generó finalmente este método de diseño.

Parte del método fue desarrollado interpretando los resultados del modelo de elementos finitos basados en el comportamiento de una losa de espesor variable y dimensiones finitas (457 x 366 centímetros) a la cual se le aplicaron cargas al centro, de borde y de esquina, considerando diferentes condiciones de apoyo y soporte.

El método de diseño de la PCA considera dos criterios de evaluación en el procedimiento de diseño, el criterio de erosión de la sub-base por debajo de las losas y la fatiga del pavimento de concreto.

---

<sup>10</sup> Guía para el Diseño y Construcción de Pavimentos Rígidos, Ing. Aurelio Salar Rodríguez , IMCYC

El criterio de erosión reconoce que el pavimento puede fallar por un excesivo bombeo, erosión del terreno de soporte y diferencias de elevaciones en las juntas. El criterio del esfuerzo de fatiga reconoce que el pavimento pueda fallar, presentando agrietamiento derivado de excesivas repeticiones de carga.

Este método considera algunas limitaciones en los valores de módulo de reacción K del suelo, en donde el rango de valores para los que el método fue desarrollado oscila entre los 50 y 700 PSI.

Una ventaja que se debe reconocer en el método del PCA es que toma el tráfico real que estima circulará sobre el pavimento, sin convertirlo Ejes Sencillos Equivalentes (ESAL's).

#### **6.5. Elección del Método de Diseño para Pavimentos de CCR**

De los comentarios anteriores podemos concluir, que no es responsable utilizar el método de AASHTO 93, esto debido a que fue concebida mediante resultados obtenidos de pruebas realizadas a pavimentos con un comportamiento específico. Ahora bien, si aplicamos este método con otro tipo de pavimento como es el de CCR, aunque su comportamiento o mejor dicho sus propiedades ingenieriles sean similares a las del concreto convencional, siempre hay que tener presente que no es el mismo concreto, ya que existen variantes entre ellos, como por ejemplo sus módulos de elasticidad respectivos e incluso su durabilidad, por tanto, no estaríamos siguiendo un procedimiento adecuado al diseñar espesores para CCR con la norma AASHTO 93.

En cuanto al suplemento 98 de la norma AASHTO, el cual trae como novedades el empleo del valor K elástico, ajustable por estacionalidad en reemplazo del K compuesto utilizado anteriormente. Realizando un paréntesis para explicar la perspectiva de la Guía AASHTO sobre el valor de soporte de la subrasante se dice que, solamente la componente elástica de la deformación es representativa de la respuesta de la subrasante ante las cargas del tránsito debido a que el K compuesto asumía una gran

cantidad de deformación permanente y no representa el soporte que el pavimento realmente experimenta durante la carga del tránsito.

El suplemento de la AASHTO de 1998, incluye mejoras como es el efecto de la base sobre la losa debido a cargas, gradientes de temperatura y humedad, también se incorporó un procedimiento por fallas en juntas directamente a través de su interacción con el soporte de la losa y el efecto combinado de cargas y tensiones de curvado por temperaturas y se incluye un nuevo diseño para pavimentos de hormigón. Por tanto, es claro que la norma AASHTO con su suplemento de 1998 a superado con creces las debilidades de la AASHTO 93, incluyendo nuevas variables y mejorando su metodología de diseño para pavimentos de concreto pero aún no se han realizado estudios experimentales a escala natural para pavimentos del tipo CCR por esta Asociación, esto no quiere decir que se descarta esta norma para ser implementada al CCR, más bien es factible aplicarla, solamente por consideraciones estrictamente experimentales la presente obra no aplicará esta metodología para el diseño de espesores de pavimento de CCR.

Ahora bien, evaluando el método de la PCA sabemos que está basado más en teorías del comportamiento del pavimento que en métodos empíricos, aunque también considera criterios de experiencias logradas mediante tramos de pruebas. La PCA como una asociación logró financiar un tramo a escala natural de un Pavimentos Compactados con Rodillos, logrando recabar una valiosa información la cual no se tenía disponible. Los resultados obtenidos de esta prueba vinieron a ser una información complementaria al momento de diseñar espesores de Pavimentos con CCR con el método de la PCA, ya que se está considerando el comportamiento real de un pavimento en particular, en este caso el CCR y no así las consideraciones de la AASHTO.

Si bien es cierto el método de la PCA en sus variables de diseño no solicita o considera el gradiente de temperatura, el cual es muy incidente en la realidad, por tanto, se estima conveniente utilizar software de diseño para Pavimentos Compactados con Rodillos que sí incluyen esta variable. Esto tiene el objetivo que el resultado final sea el espesor más

conveniente tanto en costos como en eficiencia y que este cumpla en la realidad las perspectivas de diseño.

Concluyendo en la elección del método, valoramos que la norma más eficiente a ser utilizada en la actualidad para CCR es el método de la PCA, sugiriendo que sea complementada con un software de diseño para este tipo de pavimento o que considere elementos finitos, para que el resultado final sea lo más eficaz posible.



## **CAPITULO 7**

### **DISEÑO Y CALCULO DE ESPESORES DE PAVIMENTOS**

---

#### **7.1. ESTUDIO DE TRÁFICO.**

#### **7.2. METODOLOGIA PARA LA OBTENCION DEL TRANSITO PROMEDIO DIARIO ANUAL PROYECTADO**

La Recopilación y análisis de la información histórica existente de las Estación de Conteos Volumétricos de Tráfico que aportan parte de sus flujos vehiculares actuales a la corriente vehicular de las Carreteras NIC. – 3 (San Rafael del Norte – San Sebastián de Yalí - Condega) es el primer paso para lograr obtener el resultado final de nuestro estudio de tráfico. Luego se prosigue a la recolección de datos de campos los cuales se obtuvieron mediante conteos, clasificación vehicular y encuestas origen y destino.

Para la determinación de los volúmenes de tráfico a proyectar, se utilizó un modelo estadístico de regresión lineal, como resultado de correlacionar las variables socioeconómicas (Producto Interno Bruto – PIB, y la Población) con el TPDA de la estación Permanente N° 111 (Condega – Shell Palacagüina), El Consultor hace uso de los registros estadísticos del TPDA de esta estación para correlacionarla con el PIB y las otras variables.

Las series históricas de los volúmenes de tráfico de la carretera sirvieron como base de las proyecciones junto al análisis de otras variables, tales como:

- Tasas de Crecimiento del Producto Interno Bruto PIB e Ingreso Per Cápitá IPC (2000 – 2009).
- Datos poblacionales y los pronósticos de crecimiento de INIDE para el período 2000 – 2050 y “Las Estimaciones y Proyecciones de la Población Nacional, Departamental y Municipal, Revisión 2007”
- Serie históricas del TPDA de la estación permanente N° 111 (2000 – 2009).

Se comparó el crecimiento o decrecimiento de cada variable socioeconómica con el TPDA de la carretera, a fin de obtener una tendencia que relacione estas variables y obtener la elasticidad de la correlación de las variables, para multiplicarlas por el valor del PIB, y utilizar el resultado de este producto como factor de crecimiento, haciendo una proyección de tráfico acorde con el escenario de crecimiento económico del País. En este caso para las proyecciones del tráfico de los años de diseño y construcción, se revisó la tasa de crecimiento anual de la estación permanente N° 111 (Condega – Shell Palacagüina), cuyo valor es de 3.38 % (TABLA N° 5. ), que es la estación maestra que gobierna ese tramo de carretera, la cual resulta muy cercana a las cifras del PIB del 3.50 % asumidas por el Consultor, al igual que el crecimiento esperado por el Gobierno de Nicaragua del 3.0 % para ese año (2009), por lo que se hizo uso del 3.50 % del PIB para la proyección.

**TABLA N° 5.**

No. Estación	Estación Permanente	Tasas Crecimiento
100	Punta de Plancha – Emp. San Benito	6.21%
107	Sébaco – Emp. San Isidro	1.60%
111	Condega – Shell Palacagüina	3.38%
200	Ent. INCAE – El Crucero	1.92%
206	Nandaime – Rivas	8.15%
300	Sébaco – Quebrada Honda	6.68%
400	Ent. Esquipulas – Emp. Ticuantepe	4.84%
405	Emp. Guanacaste – Emp. Nandaime	1.66%
700	Emp. Camoapa – Tecolostote	3.90%
902	Boaco – El Portón	2.00%
1100	Emp. Coyotepe – Emp. Zambrano	3.95%
1200	Auto Hotel Nejapa – Emp. Santa Rita	5.43%
1205	Emp. Chichigalpa – Chinandega	5.25%
2400	Chinandega (Rotonda) – Ranchería	5.76%

2603	Malpaisillo – Los Zarzales	6.48%
2800	Los Brasiles – Nagarote	5.53%

Fuente: Revista Anuarios de Aforos de Tráfico 2009

Al definir todos los criterios para determinar la proyección vehicular, se continuó con el proceso de cálculo obteniendo el TPDA proyectado, para el tráfico normal, tráfico desarrollado y tráfico atraído; obteniendo de la sumatorias de estos el tráfico total presentado en la tabla N° 6, la cual, será la base para encontrar las repeticiones de cargas esperadas por clasificación vehicular:

**Proyección del tráfico Promedio Diario Anual (TPDA)  
Período 2014 – 2033.  
(vpd)**

**TABLA N° 6.**

Tráfico Total		Carretera: San Sebastián de Yalí – Condega													
Año	Motos	Vehículos Livianos			Pesados de Pasajeros			Pesados de Carga				Veh. Pesados		Otros	Total (vpd)
		Autos	Jeep	Cta	Mbus	Mb> 15 P	Bus	Liv C2	C2	C3	TxSx ≥5e.	VA	VC		
2011	48	18	16	66	3	0	9	27	25	10	0	1	1	4	228
2012	50	19	16	69	3	0	9	28	26	10	0	1	1	4	236
2013	51	20	17	71	3	0	9	29	27	11	0	1	1	5	244
2014	54	21	25	106	3	0	10	33	31	12	0	1	1	5	301
2015	57	22	28	118	3	0	10	36	34	13	0	1	1	5	330
2016	61	23	31	133	4	0	11	39	38	14	0	1	1	5	362
2017	64	24	34	143	4	0	12	44	42	15	0	1	1	6	391
2018	68	26	36	155	4	0	12	48	46	17	1	1	1	6	421
2019	72	27	39	167	4	1	13	53	51	19	1	1	2	6	456
2020	77	29	42	180	5	1	14	59	57	21	1	1	2	7	494
2021	82	31	45	193	5	1	15	66	63	23	1	1	2	7	534
2022	87	33	49	207	5	1	16	73	70	25	1	2	2	8	577
2023	92	35	53	224	6	1	17	81	77	28	1	2	2	8	626
2024	99	38	57	240	6	1	18	91	86	32	1	2	3	9	681
2025	106	40	65	278	6	1	19	101	96	35	1	2	3	9	764
2026	113	43	68	290	7	1	21	113	109	40	1	3	3	10	821
2027	121	46	73	312	7	1	22	127	120	44	1	3	4	11	893
2028	130	49	79	336	8	1	24	143	134	50	1	3	4	12	974
2029	140	53	85	363	8	1	25	162	152	56	2	4	5	12	1,068
2030	151	57	92	391	9	1	27	183	171	64	2	4	5	13	1,172
2031	162	62	99	422	10	1	30	207	193	72	2	5	6	14	1,286
2032	175	67	107	456	11	1	32	235	218	82	2	5	7	16	1,413
2033	189	72	115	489	11	1	34	266	246	93	3	6	7	19	1,552

Fuente: Ministerio de Transporte e Infraestructura (MTI)

### 7.3. CALCULO DE REPETICIONES ANUALES ESPERADAS

Obtenido nuestra proyección del tránsito promedio diario anual para un período de 20 años y una tasa de crecimiento del 3.50%, se procedió a obtener nuestras estimaciones de repeticiones anuales. Para ello se tendrá en consideración dos variables importantes como son: factor dirección (D), el cual se obtiene de los estudios de tráfico realizados por el consultor mediante las encuestas origen-destino y la otra variable sería factor carril (C), que es dado por la cantidad de carriles que tendrá la carretera por sentido.

Por tanto, la ecuación aplicarse será la siguiente:

$$R = T * 365 * D * C$$

Donde:

RAE: Repeticiones Anuales Esperadas

TPDAp: Tránsito promedio diario anual proyectado

365: Días considerado por año

D: Factor Dirección. La distribución será del 50% por carril (0.50)

C: Factor Carril el cual será de 1 ya que se tendrá un carril por sentido

Teniendo definidos nuestras variables de cálculo se obtendrán nuestras repeticiones esperadas para cada tipo de vehículo a como mostramos en la siguiente tabla, cabe aclarar que se dejaron por fuera los vehículos livianos debido a que no tienen incidencia en el método de la Asociación de Cemento Portland:

**TABLA N° 7**

Tráfico Total														
REPETICIONES ANUALES ESPERADAS - Carretera: San Sebastián de Yali -Condega														
Año	Vehículos Livianos				Pesados de Pasajeros			Pesados de Carga				Veh. Pesados		Total Repeticiones Esperadas Anuales
	Motos	Autos	Jeep	Cta	Mbus	Mb> 15 P	Bus	Liv C2	C2	C3	T3S2 ≥5e.	VA	VC	Otros
2014					548	0	1,825	6,023	5,658	2,190	0	183	183	913
2015					548	0	1,825	6,570	6,205	2,373	0	183	183	913
2016					730	0	2,008	7,118	6,935	2,555	0	183	183	913
2017					730	0	2,190	8,030	7,665	2,738	0	183	183	1,095
2018					730	0	2,190	8,760	8,395	3,103	183	183	183	1,095
2019					730	183	2,373	9,673	9,308	3,468	183	183	365	1,095
2020					913	183	2,555	10,768	10,403	3,833	183	183	365	1,278
2021					913	183	2,738	12,045	11,498	4,198	183	183	365	1,278
2022					913	183	2,920	13,323	12,775	4,563	183	365	365	1,460
2023	NO SE CONSIDERAN POR TENER POCO INCIDENCIA EN EL METODO PCA				1,095	183	3,103	14,783	14,053	5,110	183	365	365	1,460
2024					1,095	183	3,285	16,608	15,695	5,840	183	365	548	1,643
2025					1,095	183	3,468	18,433	17,520	6,388	183	365	548	1,643
2026					1,278	183	3,833	20,623	19,893	7,300	183	548	548	1,825
2027					1,278	183	4,015	23,178	21,900	8,030	183	548	730	2,008
2028					1,460	183	4,380	26,098	24,455	9,125	183	548	730	2,190
2029					1,460	183	4,563	29,565	27,740	10,220	365	730	913	2,190
2030					1,643	183	4,928	33,398	31,208	11,680	365	730	913	2,373
2031					1,825	183	5,475	37,778	35,223	13,140	365	913	1,095	2,555
2032					2,008	183	5,840	42,888	39,785	14,965	365	913	1,278	2,920
2033					2,008	183	6,205	48,545	44,895	16,973	548	1,095	1,278	3,468
Total de Repeticiones Esperadas por Descomposición Vehicular					23,000	2,745	69,719	394,207	371,209	137,792	4,021	8,949	11,321	34,315
														1,057,278

Fuente: Propia

## 7.4. DESCOMPOSICIÓN DE EJES VEHICULARES

Para la aplicación del cálculo de espesores de pavimento mediante el método de la PCA es requerido descomponer cada vehículo tipo por ejes, sencillo, Tándem o Trident según sea el caso y así obtener las repeticiones de cargas esperadas por cada tipo de eje.

Para el procedimiento de cálculo simplemente se selecciona el vehículo *tipo* del más liviano al más pesado, esto solo para llevar un orden consecuente, se descomponen según cuantos ejes tenga y se aplica una carga a cada eje del mismo, según el diagrama de cargas permisibles (ver anexo N° 1). Esta información será esencial para el análisis de fatiga y análisis de erosión del método de la PCA, por tanto, presentamos los resultados en las siguientes tablas resumen:

**TABLA N° 8**

**EJES SENCILLOS**

DESCOMPOSICION POR EJES DE VEHICULOS TIPO					
EJE	TIPO DE EJE	VEHICULO TIPO	CARGA (Toneladas)	CARGA (Kips)	TOTAL REPETICIONES ESPERADAS
-	-	Mbus	-	0	-
-	-	Mb> 15 P	-	0	-
-	-	Bus	-	0	-
Delanteras	Sencillo	Liv C2	1.67	3.67	394,207.00
Traseras	Sencillo	Liv C2	3.33	7.33	394,207.00
Delanteras	Sencillo	C2	5	11.00	371,209.00
Traseras	Sencillo	C2	10	22.00	371,209.00
Delanteras	Sencillo	C3	5	11.00	137,792.00
Delanteras	Sencillo	T3S2 ≥5e.	5	11.00	4,021.00
<b>SUMA =</b>				0	<b>1,672,645.00</b>

Fuente: Propia

**TABLA N° 9**

**EJES TANDEM**

DESCOMPOSICION POR EJES DE VEHICULOS TIPO					
EJE	TIPO DE EJE	VEHICULO TIPO	CARGA (Toneladas)	CARGA (Kips)	TOTAL REPETICIONES ESPERADAS
-	-	Mbus	-	0	-
-	-	Mb> 15 P	-	0	-
-	-	Bus	-	0	-
Traseras	Tandem	C3	16.5	36.30	137,792.00
Medio	Tandem	T3S2 ≥5e.	16	35.20	4,021.00
Traseras	Tandem	T3S2 ≥5e.	16	35.20	4,021.00
<b>SUMA =</b>					<b>145,834.00</b>

Fuente: Propia

## **7.5. CALCULO DE MÓDULO DE REACCION DE LA SUB-RASANTE (VALOR K)**

### **7.5.1. Obtención de CBR de campo**

Según los estudios realizados de campo, como de laboratorios, todo el tramo San Sebastián de Yalí - Condega se encuentra revestido por una o varias capas de materiales granulares de buena a muy buena calidad que se clasifican según el sistema de la AASHTO como A-2-6 (0), A-2-4 (0) y A-2-7 (0) principalmente, también una buena parte de ellos clasifican como A-1-a (0) y A-1-b (0), presentan buen comportamiento tanto estructural como funcionalmente.

Se efectuaron sondeos manuales a lo largo del camino espaciados cada 100m de longitud, ubicados de forma alterna centro, izquierda, derecha de la línea central y hasta 1.5 m de profundidad máxima. Las muestras de materiales encontrados fueron clasificadas en el campo de manera preliminar usando procedimientos rutinarios de vista y tacto.

En las muestras de materiales del camino tomadas cada 500 metros de longitud, y que constituyen la sub rasante de dicho camino, se les determinó adicionalmente su densidad seca máxima y humedad óptima de acuerdo con la metodología Próctor Estándar, para finalmente determinar su resistencia o valor relativo soporte (CBR) a 90%, 95% y 100% de compactación, mediante la designación AASHTO T-99 y T-180 para el próctor modificado.

Teniendo los resultados de CBR al 95%, proporcionado por el estudio de factibilidad (ver anexo N°2) procederemos a obtener CBR de secciones homogéneas mediante el método de diferencias acumuladas la cual expondremos a continuación.

### **7.5.2. Definición de secciones homogéneas para valores de CBR de campo**

Aplicando el método de las diferencias acumuladas para los valores de CBR obtenidos mediante pruebas de laboratorio, definiremos nuestras secciones homogéneas para

luego calcular nuestro CBR promedio de cada sección definida y posteriormente realizar el análisis correspondiente de los resultados para definir nuestros tramos críticos.

Tomando los valores de CBR al 95% del **anexo N°2** calculamos el CBR promedio por segmento (cada 500 m), de ahí procedemos a calcular el Área correspondiente a cada segmento obteniendo de esta manera el área acumulada. El área acumulada dividido entre la longitud total del tramo a analizar, obtenemos un factor "F", este a su vez se multiplicará por la longitud acumulada de cada segmento y el producto de estos se restará del área acumulada de cada segmento, el resultado de esta operación matemática será un factor el cual denominaremos "Z".

Los valores de "Z" nos indicarán las variaciones de las secciones en las cuales identificaremos los segmentos homogéneos. Los resultados obtenidos del procedimiento anteriormente descrito se reflejan en la siguiente tabla resumen:



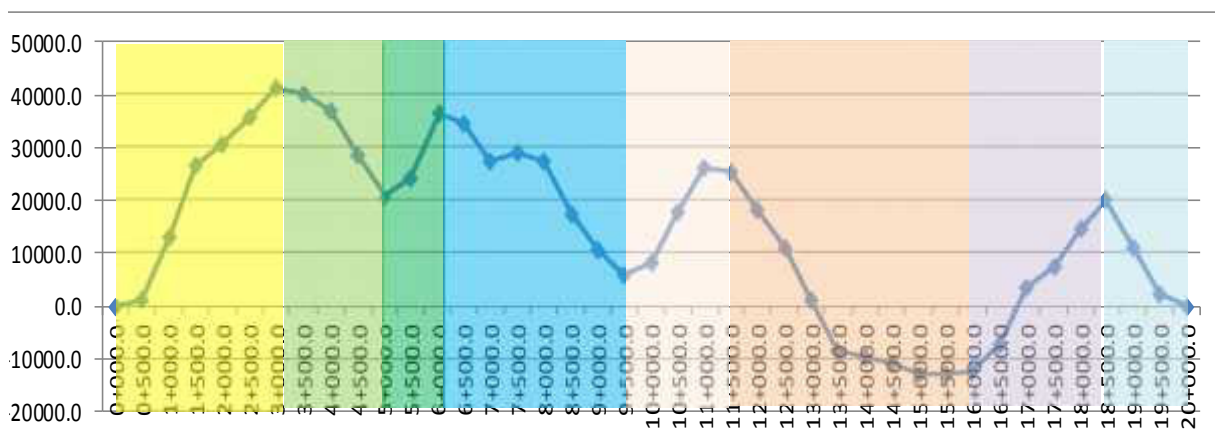
**DIFERENCIAS ACUMULADAS PARA LOS VALORES OBTENIDOS DE "CBR" DEL  
PROYECTO YALÍ – CONDEGA**

**TABLA N° 10**

Cadenamiento (PK)	CBR (95%)	No. de Segment	Longitud Parcial (m)	Longitud Acumulada (m)	CBR promedio del segment	Area (CBR Prom. x Longitud Parcial)	Area Acumulada	Z (Área acumulada F*Longitud Acumulada)	CBR (Promedio de la sección homogénea)
"(1)"	"(2)"	"(3)"	"(4)"	"(5)"	"(6)"	"(7)"	"(8)"	"(9)"	
0+000.0	0	1	0.0	0.0	0.0	0.00	0.00	0.00	
0+500.0	50	2	500.0	500.0	25.0	12,500.00	12,500.00	857.50	
1+000.0	45	3	500.0	1,000.0	47.5	23,750.00	36,250.00	12,965.00	
1+500.0	55	4	500.0	1,500.0	50.0	25,000.00	61,250.00	26,322.50	
2+000.0	7.3	5	500.0	2,000.0	31.2	15,575.00	76,825.00	30,255.00	
2+500.0	60	6	500.0	2,500.0	33.7	16,825.00	93,650.00	35,437.50	
3+000.0	9.8	7	500.0	3,000.0	34.9	17,450.00	111,100.00	41,245.00	
3+500.0	32	8	500.0	3,500.0	20.9	10,450.00	121,550.00	40,052.50	
4+000.0	1.6	9	500.0	4,000.0	16.8	8,400.00	129,950.00	36,810.00	
4+500.0	12	10	500.0	4,500.0	6.8	3,400.00	133,350.00	28,567.50	
5+000.0	1.7	11	500.0	5,000.0	6.9	3,425.00	136,775.00	20,350.00	
5+500.0	60	12	500.0	5,500.0	30.9	15,425.00	152,200.00	24,132.50	
6+000.0	36	13	500.0	6,000.0	48.0	24,000.00	176,200.00	36,490.00	
6+500.0	2	14	500.0	6,500.0	19.0	9,500.00	185,700.00	34,347.50	
7+000.0	15.7	15	500.0	7,000.0	8.9	4,425.00	190,125.00	27,130.00	
7+500.0	38	16	500.0	7,500.0	26.9	13,425.00	203,550.00	28,912.50	
8+000.0	2.4	17	500.0	8,000.0	20.2	10,100.00	213,650.00	27,370.00	
8+500.0	4	18	500.0	8,500.0	3.2	1,600.00	215,250.00	17,327.50	
9+000.0	15	19	500.0	9,000.0	9.5	4,750.00	220,000.00	10,435.00	
9+500.0	12.5	20	500.0	9,500.0	13.8	6,875.00	226,875.00	5,667.50	
10+000.0	44	21	500.0	10,000.0	28.3	14,125.00	241,000.00	8,150.00	
10+500.0	41	22	500.0	10,500.0	42.5	21,250.00	262,250.00	17,757.50	
11+000.0	38	23	500.0	11,000.0	39.5	19,750.00	282,000.00	25,865.00	
11+500.0	6.7	24	500.0	11,500.0	22.4	11,175.00	293,175.00	25,397.50	
12+000.0	11	25	500.0	12,000.0	8.9	4,425.00	297,600.00	18,180.00	
12+500.0	6	26	500.0	12,500.0	8.5	4,250.00	301,850.00	10,787.50	
13+000.0	2	27	500.0	13,000.0	4.0	2,000.00	303,850.00	1,145.00	
13+500.0	5.2	28	500.0	13,500.0	3.6	1,800.00	305,650.00	-8,697.50	
14+000.0	37	29	500.0	14,000.0	21.1	10,550.00	316,200.00	-9,790.00	
14+500.0	5.4	30	500.0	14,500.0	21.2	10,600.00	326,800.00	-10,832.50	
15+000.0	33	31	500.0	15,000.0	19.2	9,600.00	336,400.00	-12,875.00	
15+500.0	14.3	32	500.0	15,500.0	23.7	11,825.00	348,225.00	-12,692.50	
16+000.0	33	33	500.0	16,000.0	23.7	11,825.00	360,050.00	-12,510.00	
16+500.0	34	34	500.0	16,500.0	33.5	16,750.00	376,800.00	-7,402.50	
17+000.0	55	35	500.0	17,000.0	44.5	22,250.00	399,050.00	3,205.00	
17+500.0	7.4	36	500.0	17,500.0	31.2	15,600.00	414,650.00	7,162.50	
18+000.0	68	37	500.0	18,000.0	37.7	18,850.00	433,500.00	14,370.00	
18+500.0	1.3	38	500.0	18,500.0	34.7	17,325.00	450,825.00	20,052.50	
19+000.0	9	39	500.0	19,000.0	5.2	2,575.00	453,400.00	10,985.00	
19+500.0	3.1	40	500.0	19,500.0	6.1	3,025.00	456,425.00	2,367.50	
20+000.0	34	41	500.0	20,000.0	18.6	9,275.00	465,700.00	0.00	

Grafica N° 1.

### GRÁFICA DEL MÉTODO DE LAS DIFERENCIAS ACUMULADAS



Definidas las secciones homogéneas e identificando los cambios bruscos en los valores de soportes relativos del suelo mediante el método de diferencias acumuladas podremos detectar los tramos más significativos por la longitud que contienen y el CBR promedio de estos tramos respectivos.

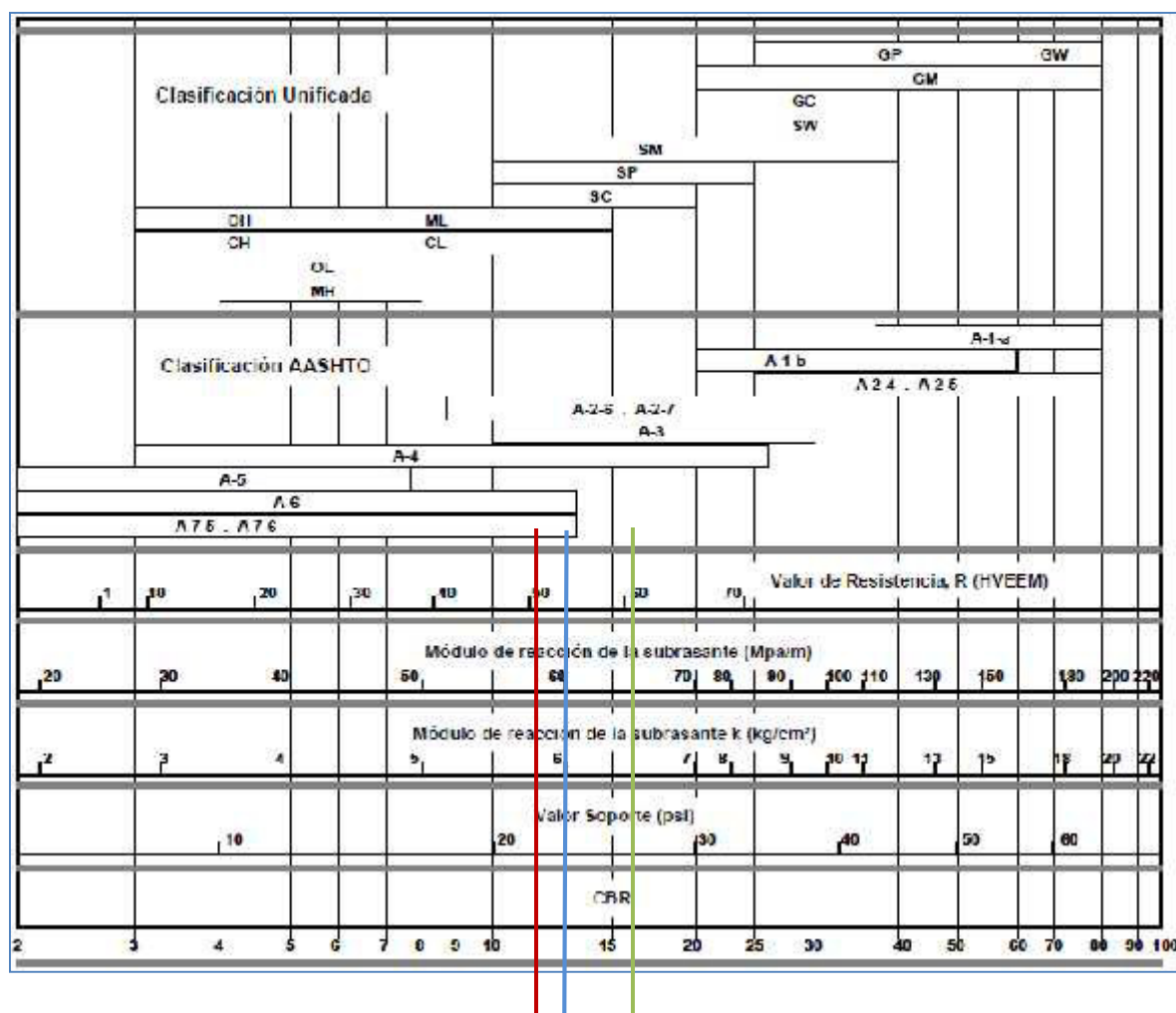
Analizando la tabla N°10 y la gráfica N°1 podemos deducir que los CBR más desfavorables que están contenido dentro de los tramos más significativos tenemos el CBR = 12, CBR = 13 y CBR= 16, los cuales son los que consideraremos en cálculos posteriores, por consiguiente, se harán tres diseños para fines didácticos y concluiremos al final de este documento que valor del espesor de pavimento usaremos que nos garantice la calidad requerida y la factibilidad económica del proyecto. Cabe mencionar que se presentan tramos puntuales en los cuales se requerirán realizar mejoramiento de suelos debido al soporte muy bajo de la capacidad del suelo que se obtuvieron de ellos, estos se abordarán y haremos nuestras recomendaciones respectivas en acápite posterior del presente documento llamado "RECOMENDACIONES".

### 7.5.3. Cálculo de valor “k” mediante tabla de correlaciones

El procedimiento para lograr tener el valor de K en este punto del cálculo es sencillo, definidos nuestros CBR, considerados los más desfavorables en los tramos más significativos correspondientes a los valores de 12, 13 y 16, proseguimos a ubicarlos en nuestra tabla de correlaciones proyectando una línea vertical hasta que se intersecte con la abscisa que dice Módulo de reacción de la subrasante k (Kg/cm<sup>3</sup>).

**TABLA N° 11**

Correlación aproximada entre la clasificación de los suelos y los diferentes ensayos



CBR= CBR= CBR=  
12 13 16

**Fuente:** Manual Centroamericano para Diseño de Pavimentos, Página 70.

Realizando el procedimiento anterior para CBR=12, 13 y 16 respectivamente obtenemos los siguientes valores:

**TABLA 12**

Resumen de Valores de k Obtenidos de la Tabla de Correlaciones

VALOR CBR	MÓDULO DE REACCION DE LA SUBRANTE (KG/CM3)	MÓDULO DE REACCION DE LA SUBRANTE (Mpa/M)	MÓDULO DE REACCION DE LA SUBRANTE (Lbs/Pulg3)
<b>12</b>	5.81	58.10	209.90
<b>13</b>	6.00	60.00	216.76
<b>16</b>	6.47	64.70	233.74

Los valores obtenidos serán la base para obtener nuestros módulos reacción combinado que no son más que una proyección del valor de soporte de suelo con una sub-base tratada. Es conveniente conocer que un error de un 100% en la obtención del valor k, se traduce en un centímetro de incremento en el espesor de la estructura de pavimento.

Precedente a la definición de un k compuesto se requiere establecer un espesor en la estructura que soportará nuestro pavimento, Sub-base. Para ello, tenemos en consideración el buen comportamiento del suelo existente, su capacidad de soporte actual y las características físicas del material del cual está compuesto determinado estrato; otro criterio importante es que se requiere considerar una base bastante uniforme e impermeable debido a que se trabajará un Concreto Compactado con Rodillo y las fallas por erosión están latentes, así también las condiciones requeridas de manejabilidad al momento de construirlo. Por consiguiente, hemos considerado una Sub-base tratada con cemento con un espesor mínimo dentro de los límites recomendados de **6 pulgadas**.

Definido el tipo de sub-base a utilizar (**sub-base tratada con cemento**), su espesor (**6 plg**) y nuestros valores k obtenidos según Tabla N° 12, podemos fácilmente obtener los módulos de reacción de la subrasante compuesto (kc) mediante la tabla N°13.

**TABLA N° 13**

**VALOR TÍPICO DE MÓDULO DE REACCIÓN COMBINADO  $k_c$ , PARA DIFERENTES TIPOS Y ESPESORES DE SUBBASE**

VALOR TÍPICO DEL MÓDULO DE REACCIÓN COMBINADO, $k_c$ , PARA DIFERENTES TIPOS Y ESPESORES DE SUBBASE																				
Módulo de reacción de la subrasante $k$ . (lb/pulg.3)	Módulo de reacción combinado, $k_c$ (lb/pulg.3) para diferentes subbases y espesores, en pulg.																			
	Subbase de grava y arena redondeadas				Subbase de grava triturada bien graduada				Subbase tratada con áfalto				Subbase tratada con cemento				Econocreto			
	4	6	8	10	4	6	8	10	4	6	8	10	4	6	8	10	4	6	8	10
50	60	70	80	90	65	75	90	100	84	112	141	170	101	145	193	245	104	156	205	262
100	120	130	160	180	130	150	170	190	144	198	243	288	185	258	334	414	192	271	364	443
150	160	190	220	230	180	200	230	250	221	277	334	392	265	360	460	563	274	378	488	603
200	230	250	265	275	240	260	275	300	284	351	419	487	341	457	577	700	353	480	612	750

Fuente: Tabla de Valor Típico del Módulo de Reacción Combinado del Libro "Pavimentos de Concreto para Carreteras, Vol. 1" Pág. I-56.

Habiendo definido el tipo de subbase a utilizar (*tratada con cemento*), el espesor propuesto para dicha capa (*6 pulgadas*) y los valores de  $k$  calculados según tabla de correlaciones, procedemos a interpolar con los valores presentados en la tabla N°13 y de esta manera obtener los valores de  $k$  compuesto ( $k_c$ ).

Observando los valores de  $k$  calculados mostrados en tabla N°12 y los rangos presentados para el módulo de reacción en la tabla N°13, vemos que los valores de los módulos de reacción existentes para los CBR 12, 13 y 16 son mayores, por tanto, usaremos de manera conservadora un  $k$  compuesto ( $k_c$ ) de **457 lb/pulg.3** para los tres módulos de reacción calculados a como se presenta en la siguiente tabla resumen:

**TABLA N° 14**

**Resumen de  $k$  compuestos calculados**

CBR	K CALCULADO (LB/PULG.3)	K COMPUESTO (LB/PULG.3)
<b>12</b>	209.90	457
<b>13</b>	216.76	457
<b>16</b>	233.74	457

## 7.6. CALCULO DE ESPESOR DE PAVIMENTO MEDIANTE EL ANALISIS DE FATIGA Y EROSION

### 7.6.1. Variables de diseño para Pavimento sin Apoyo Lateral o Acotamiento

Introduciéndonos en lleno al método de la Asociación de Cemento Portland (PCA), luego de haber realizados los cálculos de:

- Proyección de tránsito promedio anual (TPDA),
- Descomposición de ejes vehicular
- Obtención de los CBR de campos más desfavorables en los tramos más significativos.
- Cálculo de Módulos de Reacción de la Sub-rasante compuestos.

Podemos definir nuestras variables de diseño para el cálculo de espesores de pavimento, el cual, se calculará en una primera instancia *sin acotamiento* y luego se hará *con acotamiento* para poder realizar la comparación de la diferencia en los espesores obtenidos y evaluar más objetivamente la decisión final de selección. En la tabla siguiente se muestran los datos de entrada para el cálculo de espesor *sin acotamiento*:

**TABLA N° 15**

#### **DATOS DE ENTRADA (SIN ACOTAMIENTO)**

DESCRIPCION	VARIABLES DE DISEÑO		U.M
Módulo de Reacción de la Subrasante (k Compuesto)	Kc=	457	Lb/plg3
Módulo de Elasticidad	Ec=	4,115,284.22	Lb/plg2
Módulo de Ruptura	Mr=	653.22 (45)	Lb/plg2 (Kg/cm2)
Factor de Seguridad de Carga	LSF=	1.1	
Pasajuntas (SI o NO)	P=	NO	
Acotamiento (SI o NO)	A=	NO	
Período de Diseño	P.D=	20	Años
Espesor de Pavimento Propuesto	e (p)=	7.0 (17.80)	plg (cm)

Espesor de SubBase tratada con cemento	e (sb)=	6.0 (15.0)	plg (cm)
--	---------	------------	----------

Donde las variables de módulo de elasticidad y módulo de ruptura fueron calculadas según indicamos en la capítulo 3.4 del presente documento, considerando un esfuerzo deseado a la compresión ( $f_c$ ) para el cálculo de estas de **300 kg/cm<sup>2</sup>** (unidades métricas) o **4,266.96 lbs/plg<sup>2</sup>** (unidades inglesas). En cuanto al factor de seguridad de carga (LSF) podemos decir que este método de diseño exige que las cargas reales esperadas se multipliquen por factores de seguridad de carga, para lo cual se recomienda lo siguiente.

- Vías con un flujo importante de tránsito pesado, FSC = 1.2
- Vías con moderado volumen de tránsito de vehículos pesados FSC = 1.1
- Vías residenciales y otras con bajo número de tránsito FSC = 1.0

Bajo estas consideraciones hemos escogido en base a los estudios de tráfico realizados un factor de FSC = 1.1.

En referencia a los criterios o consideraciones de que si la estructura llevará o no pasajuntas es conveniente aclarar que debido a que el diseño será para un pavimento compactado con rodillo (CCR) este tipo de refuerzos no se pueden incluir debido a las características propias constructivas de este pavimento. Pero hemos dejado reflejadas dicha variable porque es una variable significativa al momento de diseñar otros tipos de pavimentos que no sean CCR.

#### **7.6.1.1. Análisis por fatiga**

Se procederá a realizar el análisis por fatiga para un espesor inicial de 7.0 pulgadas o 17.78 centímetros con los criterios y variables presentados en la tabla que contienen los datos de entrada. El cálculo del porcentajes por fatigas no deberá exceder el 100% al sumar el resultado obtenido en cada eje (sencillos, tandem y tridem). El procedimiento de cálculo lo definimos a como sigue:

Obtendremos nuestro porcentaje de fatiga mediante la relación repeticiones esperadas (3) entre repeticiones admisibles (4), donde los valores de las repeticiones esperadas la obtenemos de los resultados obtenidos de la descomposición vehicular (ver tabla N°8) y

las repeticiones admisibles a través de nomogramas como las presentadas en los anexos N°5 y 6 para el análisis de fatiga y erosión respectivamente.

El esfuerzo equivalente (8) lo encontramos en el anexo N°3 y cuando es requerido se interpolará; el factor de proporción de esfuerzos (9) es la división del esfuerzo equivalente (8) entre nuestro módulo de ruptura ( $M_r$ ); el factor de erosión (10), el cual se utilizará al momento de realizar nuestros análisis por erosión se obtiene del anexo N°4 y de igual manera que en la tabla de esfuerzos equivalentes se tendrá que interpolar cuando sea requerido.

### Análisis por Fatiga para Ejes Sencillos

1	2	3	4	5	6	7
			Análisis por Fatiga		Análisis por Erosión	
Cargas por Eje (kips)	Multiplicado por LSF	Repeticiones Esperadas	Repeticiones Admisibles	Porcentaje de Fatiga	Repeticiones Admisibles	Porcentaje de Desgaste

8 *Esfuerzo Equivalente*= 251.59 psi

Obtenido de Tabla Anexo N°3

9 *F. de proporción de Esfuerzos* 0.385

Fórmula:  $Esf. Equiv./M_{rup}$

10 *Factor de Erosión*= 3.13

Obtenido de Tabla Anexo N°4

EJES SENCILLOS						
3.67	4.037	394.207	Ilimitada	0.00%		
7.33	8.063	394.207	Ilimitada	0.00%		
11	12.1	371.209	Ilimitada	0.00%		
22	24.2	371.209	380.000	97.69%		
11	12.1	137.792	Ilimitada	0.00%		
11	12.1	4.021	Ilimitada	0.00%		
SUBTOTAL				97.69%		



## Análisis por Fatiga para Ejes Tandem

1	2	3	4	5	6	7
			Análisis por Fatiga		Análisis por Erosión	
Cargas por Eje (kips)	Multiplicado por LSF	Repeticiones Esperadas	Repeticiones Admisibles	Porcentaje de Fatiga	Repeticiones Admisibles	Porcentaje de Desgaste

*Esfuerzo Equivalente=* 203.95 psi

Obtenido de Tabla Anexo N°3

*F. de proporción de Esfuerzos*

0.312

Fórmula:  $Esf. Equiv./Mrup$

*Factor de Erosión=*

3.18

Obtenido de Tabla Anexo N°4

EJES TANDEM						
36.3	39.93	137,792	Ilimitada	0.00%		
35.2	38.72	4,021	Ilimitada	0.00%		
35.2	38.72	4,021	Ilimitada	0.00%		
SUBTOTAL				0.00%		
TOTAL			97.69%			

Como logramos apreciar el porcentaje total obtenido con las variables consideradas es del 97.69%, es un porcentaje que nos indica que la estructura así como la tenemos considerada cumple las cargas por fatigas que serán aplicadas al pavimento debido a que no excede el 100% recomendado por la PCA. Es conveniente realizar el análisis por erosión antes de tomar cualquier decisión precipitada (por ej. Aumentar el espesor de losa) debido a que ambos análisis se complementan entre sí para definir el comportamiento de la estructura propuesta.

### 7.6.1.2. Análisis por erosión

En general, el análisis por erosión es el más incidente al momento de toma de decisiones con respecto a nuestra estructura de pavimento cuando tenemos volúmenes de tráfico considerables. Así bien el análisis por fatiga nos resultó satisfactorio habría que esperar el resultado del análisis por erosión para realizar una conclusión objetiva.

Siendo así, el proceso de cálculo del análisis por erosión es similar al de análisis por fatiga diferenciándose en que la obtención de los datos se realiza en tablas y nomogramas con índices distintos.

### Análisis por Erosión para Ejes Sencillos

1	2	3	4	5	6	7
			Análisis por Fatiga		Análisis por Erosión	
Cargas por Eje (kips)	Multiplicado por LSF	Repeticiones Esperadas	Repeticiones Admisibles	Porcentaje de Fatiga	Repeticiones Admisibles	Porcentaje de Desgaste

8 *Esfuerzo Equivalente*= 251.59 psi Obtenido de Tabla Anexo N°3

9 *F. de proporción de Esfuerzos* 0.385 Fórmula: *Esf. Equiv./Mrup*

10 *Factor de Erosión*= 3.13 Obtenido de Tabla Anexo N°4

EJES SENCILLOS						
3.67	4.037	394,207			Ilimitada	0.00%
7.33	8.063	394,207			Ilimitada	0.00%
11	12.1	371,209			Ilimitada	0.00%
22	24.2	371,209			500,000	74.24%
11	12.1	137,792			Ilimitada	0.00%
11	12.1	4,021			Ilimitada	0.00%
SUBTOTAL						74.24%

## Análisis por Erosión para Ejes Tándem

1	2	3	4	5	6	7
			Análisis por Fatiga		Análisis por Erosión	
Cargas por Eje (kips)	Multiplicado por LSF	Repeticiones Esperadas	Repeticiones Admisibles	Porcentaje de Fatiga	Repeticiones Admisibles	Porcentaje de Desgaste

*Esfuerzo Equivalente*= 203.95 psi Obtenido de Tabla Anexo N°3

*F. de proporción de Esfuerzos* 0.312 Fórmula: *Esf. Equiv./Mrup*

*Factor de Erosión*= 3.18 Obtenido de Tabla Anexo N°4

EJES TANDEM						
36.3	39.93	137.792			900.000	15.31%
35.2	38.72	4.021			1.000.000	0.40%
35.2	38.72	4.021			1.000.000	0.40%
SUBTOTAL						16.11%

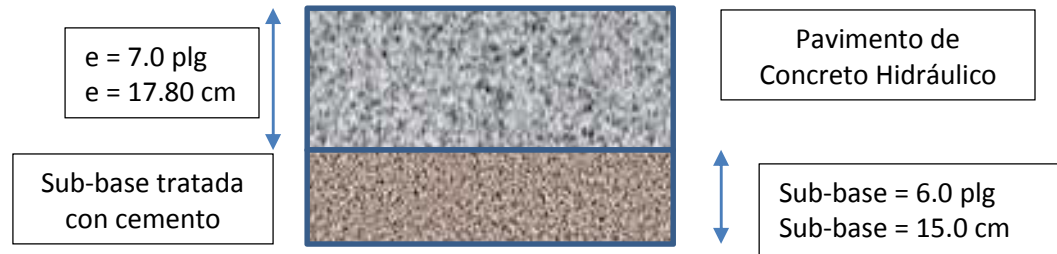
TOTAL	90.36%
-------	--------

Obtenido el resultado de 90.36% en el análisis por erosión se aprecia que el espesor propuesto cumple con este análisis dentro de los rango requeridos, es decir, no poseemos una estructura que exceda a grandes rasgo la capacidad que tendrá la vía, ni tampoco proponemos una estructura que este por debajo de las capacidades requeridas.

Analizando los resultados de fatiga y erosión siendo en este caso en particular el más incidente en el método de la PCA el análisis por erosión, esto por el tipo de vehículos y sus volúmenes de tráfico estimado los cuales son de consideración media. El análisis por fatiga influye más cuando tenemos volúmenes de tráfico relativamente bajos.

Por consiguiente, nuestra estructura de pavimento propuesta será como se muestra en la siguiente figura:

*Figura N°4: Detalle de Estructura de Pavimento Propuesta Sin Acotamiento*



#### **7.6.2. Variables de diseño para Pavimento con Apoyo Lateral o Acotamiento**

Luego de calcular el espesor requerido para un pavimento sin acotamiento de concreto o apoyo lateral procederemos a realizar el mismo procedimiento considerando esta vez un acotamiento de concreto de 1.50 metros, el cual se construirá con el mismo espesor del rodamiento y de manera homogénea con relación a la estructura principal. Este apoyo lateral nos ayudará principalmente a disminuir los esfuerzos en los bordes, así mismo servirá como estacionamiento temporales para cualquier emergencia presentada en la vía.

Los aspectos a valorar para la toma de decisión en cuanto a los dos diseños considerados (sin acotamiento y con acotamiento) serán:

- Costos de cada Alternativa
- Seguridad requerida

Por consiguiente, en la siguiente tabla se muestran los datos de entrada para el cálculo de espesor *con acotamiento*:

**TABLA N° 16**  
**DATOS DE ENTRADA (CON ACOTAMIENTO)**

DESCRIPCION	VARIABLES DE DISEÑO		U.M
Módulo de Reacción de la Subrasante (k Compuesto)	Kc=	457	Lb/plg3
Módulo de Elasticidad	Ec=	4,115,284.22	Lb/plg2
Módulo de Ruptura	Mr=	653.22 (45)	Lb/plg2 (Kg/cm2)
Factor de Seguridad de Carga	LSF=	1.1	
Pasajuntas (SI o NO)	P=	NO	
Acotamiento (SI o NO)	A=	SI	Ancho de 1.50 m
Período de Diseño	P.D=	20	Años
Espesor de Pavimento Propuesto	e (p)=	7.0 (17.80)	plg (cm)
Espesor de SubBase tratada con cemento	e (sb)=	6.0 (15.0)	plg (cm)

#### 7.6.2.1. Análisis por fatiga

Se procederá a realizar el análisis por fatiga para un espesor inicial de 7.0 pulgadas o 17.78 centímetros con los criterios y variables presentados en la tabla que contienen los datos de entrada. El cálculo del porcentajes por fatigas no deberá exceder el 100% al sumar el resultado obtenido en cada eje (sencillos, tándem y tridem).

## Análisis por Fatiga para Ejes Sencillos

1	2	3	4	5	6	7
			Análisis por Fatiga		Análisis por Erosión	
Cargas por Eje (kips)	Multiplicad o por LSF	Repeticiones Esperadas	Repeticiones Admisibles	Porcentaje de Fatiga	Repeticione s Admisibles	Porcentaje de Desgaste

8 *Esfuerzo Equivalente*= 206.66 psi

Obtenido de Tabla Anexo N°7

9 *F. de proporción de Esfuerzos*= 0.316

Fórmula: *Esf. Equiv./Mrup*

10 *Factor de Erosión*= 2.69

Obtenido de Tabla Anexo N°8

EJES SENCILLOS						
3.67	4.037	394,207	Ilimitada	0.00%		
7.33	8.063	394,207	Ilimitada	0.00%		
11	12.1	371,209	Ilimitada	0.00%		
22	24.2	371,209	Ilimitada	0.00%		
11	12.1	137,792	Ilimitada	0.00%		
11	12.1	4,021	Ilimitada	0.00%		
SUBTOTAL				0.00%		

## Análisis por Fatiga para Ejes Tandem

1	2	3	4	5	6	7
			Análisis por Fatiga		Análisis por Erosión	
Cargas por Eje (kips)	Multiplicad o por LSF	Repeticiones Esperadas	Repeticiones Admisibles	Porcentaje de Fatiga	Repeticione s Admisibles	Porcentaje de Desgaste

*Esfuerzo Equivalente*= 173.01 psi

Obtenido de Tabla Anexo N°7

*F. de proporción de Esfuerzos*= 0.265

Fórmula: *Esf. Equiv./Mrup*

*Factor de Erosión*= 2.67

Obtenido de Tabla Anexo N°8

EJES TANDEM						
36.3	39.93	137,792	Ilimitada	0.00%		
35.2	38.72	4,021	Ilimitada	0.00%		
35.2	38.72	4,021	Ilimitada	0.00%		
SUBTOTAL				0.00%		

TOTAL	0.00%
-------	-------

Dado los resultados obtenido en relación al porcentaje del análisis por fatiga, el cual resulta 0.00%, esto debido a que las repeticiones admisibles para cada tipo de carga son ilimitadas. Es conveniente completar los análisis, en este caso el análisis por erosión antes de tomar cualquier decisión precipitada (por ej. disminuir el espesor de losa) debido a que ambos análisis se complementan entre sí para definir el comportamiento de la estructura propuesta.

### 7.6.2.2. Análisis por erosión

#### Análisis por Erosión para Ejes Sencillos

1	2	3	4	5	6	7
			Análisis por Fatiga		Análisis por Erosión	
Cargas por Eje (kips)	Multiplicado por LSF	Repeticiones Esperadas	Repeticiones Admisibles	Porcentaje de Fatiga	Repeticiones Admisibles	Porcentaje de Desgaste

8 Esfuerzo Equivalente=	206.66 psi	Obtenido de Tabla Anexo N°7
9 F. de proporción de Esfuerzos=	0.316	Fórmula: Esf. Equiv./Mrup
10 Factor de Erosión=	2.69	Obtenido de Tabla Anexo N°8

EJES SENCILLOS						
3.67	4.037	394.207			limitada	0.00%
7.33	8.063	394.207			limitada	0.00%
11	12.1	371.209			limitada	0.00%
22	24.2	371.209			600.000	61.87%
11	12.1	137.792			limitada	0.00%
11	12.1	4.021			limitada	0.00%
SUBTOTAL						61.87%

## Análisis por Erosión para Ejes Tándem

1	2	3	4	5	6	7
			Análisis por Fatiga		Análisis por Erosión	
Cargas por Eje (kips)	Multiplicado por LSF	Repeticiones Esperadas	Repeticiones Admisibles	Porcentaje de Fatiga	Repeticiones Admisibles	Porcentaje de Desgaste

*Esfuerzo Equivalente=* 173.01 psi *Obtenido de Tabla Anexo N°7*

*F. de proporción de Esfuerzos=* 0.265 *Fórmula: Esf. Equiv./Mrup*

*Factor de Erosión=* 2.67 *Obtenido de Tabla Anexo N°8*

EJES TANDEM						
36.3	39.93	137.792			2.600.000	5.30%
35.2	38.72	4.021			4.100.000	0.10%
35.2	38.72	4.021			4.100.000	0.10%
SUBTOTAL						5.50%

TOTAL	67.36%
-------	--------

Obtenido el resultado de 67.36% en el análisis por erosión se aprecia que el espesor propuesto cumple con este análisis dentro de los rango requeridos, es decir, no poseemos una estructura que exceda el límite recomendado, ni tampoco proponemos una estructura con un porcentaje de desgaste demasiado bajo que nos pueda indicar un diseño poco económico.

Antes de llegar a este espesor propuesto de 7 pulgadas se procedió a iterar y calcular para espesores de 6.0 plg y 6.5 plg., en donde dichos espesores no cumplieron con el análisis por erosión.

Por consiguiente, nuestra estructura de pavimento con acotamiento de concreto propuesta será como se muestra en la siguiente figura:

*Figura N°5: Detalle de Estructura de Pavimento Propuesta Con Acotamiento*



### 7.6.3. Evaluación económica para elección del pavimento

La decisión en considerar una estructura de pavimento *Sin Acotamiento* o *Con Acotamiento* de concreto radica principalmente en la evaluación económica. Como se ha expuesto los pavimentos con apoyos laterales tienden a disminuir los esfuerzos particularmente en los bordes, por lo que se entiende que se podrían disminuir los espesores en comparación a los pavimentos sin apoyo lateral. Culminando los análisis y cálculos para ambas situaciones obtuvimos un mismo espesor de 7plg, manteniendo una base mejorada con cemento de 6 plg, claro está, que el porcentaje de desgaste para el pavimento con apoyo lateral resultó menor en relación al que no tiene considerado soporte lateral.

Por consiguiente, se presenta tabla resumen con la evaluación económica en lo que concierne a las estructuras que se están considerando:



# TABLA N°17

## RESUMEN DE COSTOS PARA CADA ESTRUCTURA DE PAVIMENTO PROPUESTA

Longitud del tramo: 20.00 km

Ancho de Calzada: 7.00 m

Acotamiento o apoyo lateral: 1.50 m

Tasa de Cambio (\$/C\$) al 6 sept. Del 2017: 30.3172

Pavimento Tipo	% Análisis por fatiga	% Análisis por erosión	Espesor de Base (cm)	Espesor de Pavimento (cm)	Concepto de Obra	Cantidad	Precio Unitario (C\$)	Monto (C\$)	Monto (\$)
Sin Acotamiento	97.69	90.36	15.00		Base Tratada con Cemento	23,560.00	1,492.80	35,170,368.00	1,160,079.69
				17.80	Pavimento de Concreto Compactado con Rodillo MR = 45kg/cm²	24,920.00	4,679.44	116,611,644.80	3,846,385.71
				Total de Costo (Pavimento Sin Acotamiento)=		151,782,012.80	5,006,465.40		
Costo por Kilómetro =								7,589,100.64	250,323.27
Con Acotamiento	0.00	67.36	15.00		Base Tratada con Cemento	32,860.00	1,492.80	49,053,408.00	1,618,005.88
				17.80	Pavimento de Concreto Compactado con Rodillo MR = 45kg/cm²	35,600.00	4,679.44	166,588,064.00	5,494,836.73
				Total de Costo (Pavimento Con Acotamiento)=		215,641,472.00	7,112,842.61		
Costo por Kilómetro =								10,782,073.60	355,642.13
DIFERENCIA DE MONTOS POR KILOMETRO								C\$	\$
Sin Acotamiento								7,589,100.64	250,323.27
Con Acotamiento								10,782,073.60	355,642.13
+ 42.07%								3,192,972.96	105,318.86

El Incremento en el costo por kilómetro es del **42.07%** del pavimento con acotamiento en comparación con el pavimento sin acotamiento, es significativo, por lo cual quedaría evaluar la disponibilidad financiera y los valores positivos que arroje la factibilidad económica para cada alternativa. Debido al diferencial de costos entre pavimento sin acotamiento y pavimento con acotamiento, se escoge evaluar los esfuerzos mediante elementos finitos al **Pavimento Sin Acotamiento** (ver *figura N°4*); si el comportamiento de este pavimento está dentro de las condiciones permisibles entonces será considerado como la opción más viable a implementarse dado el bajo volumen de tráfico que se tiene en este tramo.

## 7.7. DISEÑO DE JUNTAS

### 7.7.1. Diseño de juntas transversales

Para pavimentos CCR, no hay un método universalmente aceptado para determinar espaciamientos transversales de las juntas. Comparativamente, las grietas transversales en los pavimentos de CCR se espacian considerablemente más separados que las grietas transversales en pavimentos de hormigón convencionales, debido al hecho de que la contracción se reduce en pavimentos de CCR.

Eficiencia en la unión es la principal preocupación para la unión transversal de CCR y debe tenerse en cuenta cuando el espesor del pavimento es igual o mayor 8 plg (20.3 cm), en particular en regiones frías. Si enclavamiento agregado es crítica, la profundidad de las juntas de corte de sierra no debe exceder 1/4 del espesor del pavimento. Es razonable utilizar el espesor del pavimento (pulgadas) multiplicado por 3 a 4 para obtener una adecuada separación en juntas (en pies) para pavimentos de 8 pulg. (20.3 cm) de espesor o más grueso. Para pavimentos de menos de 8 pulg. (20.3 cm) de espesor, el espaciamiento se recomienda que sea de 15 a 20 pies (4.6 a 6.1 m) <sup>11</sup>.

Se ha considerado lo antes descrito pero también se está evaluando que los esfuerzos disminuyen con modulaciones de losas más cortas. Por ello, se decidió proponer un espaciamiento en las juntas transversales de **1.75 metros** para obtener los menores esfuerzos posibles.

---

<sup>11</sup> Guide for Roller-Compacted Concrete Pavements, National Concrete Pavement Technology Center, August 2010.

### **7.7.2. Diseño de juntas longitudinales**

Las juntas aserradas longitudinales se utilizan para aliviar las tensiones ocasionadas por el alabeo en las losas de pavimentos de CCR. Sin embargo, estas tensiones se reducen en pavimentos CCR debido a la pasta de bajo contenido y por lo tanto se reduce la contracción.

Típicamente, y en particular en la construcción de carreteras, la apertura de la junta longitudinal es mínimo en comparación con la apertura de la articulación transversal.

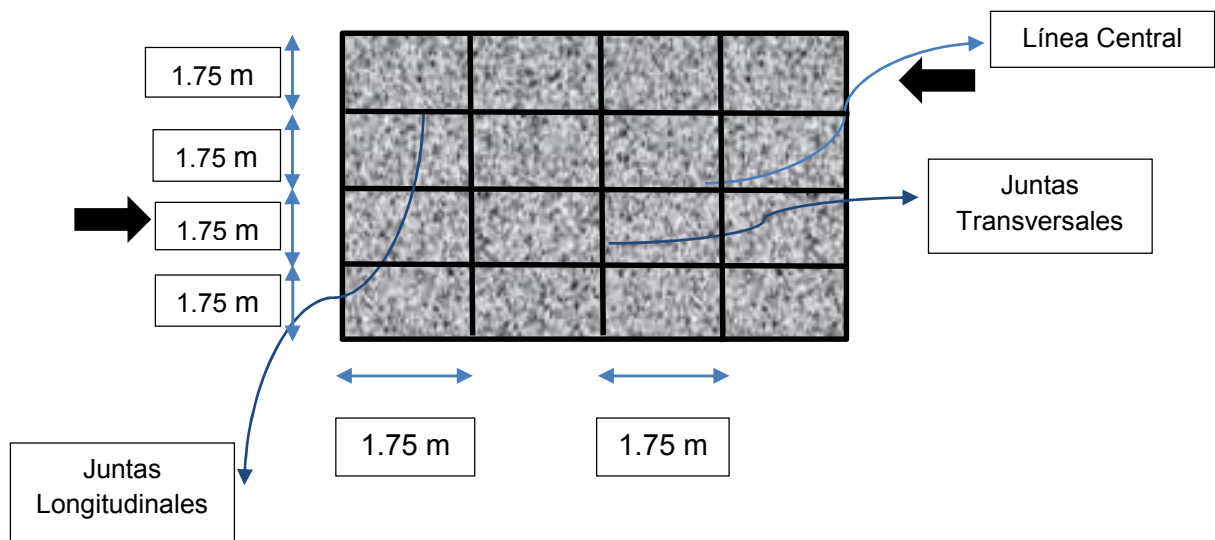
Una distancia razonable para juntas aserradas longitudinales es de 15 a 20 pies (4.6 a 6.1 m) para pavimentos menores de 8 pulg. (20.3 cm) de espesor y 2.5 veces (en pies) el espesor del pavimento (en pulgadas) para pavimentos 8 pulg. (20.3 cm) de espesor o mayor. Para grandes superficies pavimentadas, tales como sitios industriales, un patrón de unión cuadrado se prefiere con separaciones de 2.5 veces (en pies) al grosor del pavimento (en pulgadas) <sup>12</sup>.

En base a lo anterior y buscando la modulación más conveniente en la losa siempre considerando la disminución de esfuerzos estamos proponiendo tres junta longitudinal que irán una al centro de la calzada la cual dividirá los dos carriles de circulación, las otras dos irán a 1.75 m del centro una en cada carril de circulación y de esta manera tendremos una modulación simétrica de cada losa. Definido los espaciamientos de juntas tendremos una losa modulada de la siguiente manera:

---

<sup>12</sup> Guide for Roller-Compacted Concrete Pavements, National Concrete Pavement Technology Center, August 2010.

*Figura N°6: Esquema de modulación de losa propuesta*



## 7.8. OBTENCION DE ESFUERZO EN LOSA MEDIANTE EL PROGRAMA DE ELEMENTO FINITO

### 7.8.1. Preámbulo

El método de los elementos finitos es un método numérico utilizado frecuentemente para obtener la solución aproximada de un sistema de ecuaciones diferenciales parciales, permitiendo encontrar soluciones apropiadas para diversos campos de la ingeniería, uno de los tópicos en el que se utiliza más comúnmente es en los problemas físicos que poseen geometrías muy complicadas lo que hace necesario el uso de un computador para llevar a cabo la implementación del método.

El método es altamente utilizado ya que permite obtener una solución numérica aproximada sobre el comportamiento de una estructura, sobre el que están definidas ciertas ecuaciones diferenciales que se encargan de definir el comportamiento físico del problema dividiéndolo en un número elevado de subdominios no intersectantes entre sí, esto se denomina elementos finitos.

Dentro de cada elemento se encuentran una serie de puntos que permiten el movimiento de cada elemento, estos puntos son denominados nodos y son adyacentes entre ellos si pertenecen al mismo elemento, también un nodo sobre la frontera puede pertenecer a varios elementos, el conjunto de nodos y las relaciones que existen entre ellos constituyen una malla, esta malla es de gran importancia ya que a partir de esta se realiza la discretización del dominio en elementos finitos, y a su vez permite realizar los cálculos sobre cada uno de los nodos. La construcción de la malla generalmente se realiza a partir de programas especializados.

El conjunto de relaciones entre el valor de una determinada variable y los nodos se puede expresar como un sistema de ecuaciones donde el número de ecuaciones es proporcional al número de nodos, este sistema también puede ser escrito como una matriz llamada matriz de rigidez global.

Generalmente el método de elementos finitos se programa computacionalmente para calcular los desplazamientos, las deformaciones y tensiones cuando se trata de un problema de sólidos deformables o más generalmente un problema de mecánica de medios continuos. Dada la dificultad de encontrar la solución a estos problemas de manera analítica, con frecuencia en la práctica los métodos numéricos y, en particular, los elementos finitos, se convierten en una herramienta alternativa para encontrar estas soluciones, ya que la convergencia de esta metodologías puede decirse es buena.

Así pues, el software a utilizar para nuestros cálculos de esfuerzos en las losas introduciendo los criterios definidos en este documento será EVERFE 2.25, el cual, es una herramienta de análisis de elementos finitos 3D para pavimentos, desarrollado en la Universidad de Washington en cooperación con el Departamento de Transporte de Washington. En la actualidad, EVERFE es el programa finito 3D más sofisticado y fácil de usar, con elementos específicamente desarrollado para el análisis de pavimento rígido.

La secuencia de pasos en la metodología a seguir en el análisis de esfuerzos en la losa será la siguiente:

Paso 1. Definir la carga de análisis, que será una pierna de un eje equivalente,  $W_{18}$ , igual a 9,000 libras.

Paso 2. Definir el módulo de reacción de la capa base, que será de 457 pci.

Paso 3. Definir las propiedades mecánicas del concreto hidráulico:

$$E_c = 4,115,284.22 \text{ psi}, \mu = 0.15.$$

Paso 4. Definir las propiedades mecánicas del acero de dovelas:

No aplica en CCR

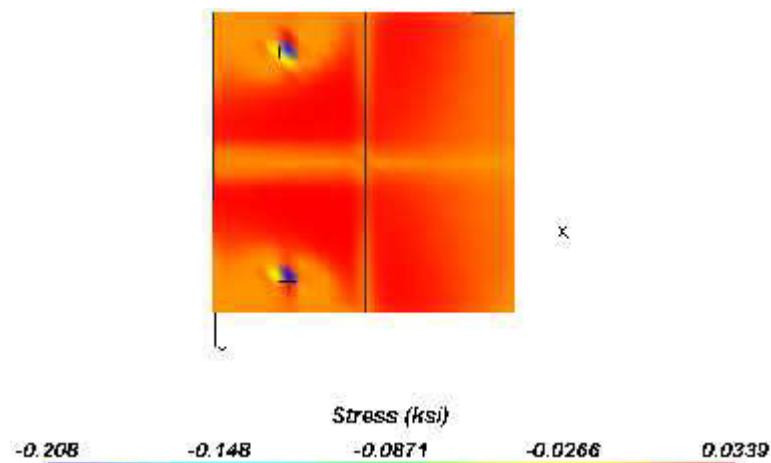
Paso 5. Definir las propiedades mecánicas del material para base estabilizada con cemento Portland:  $E_c = 800,000.0 \text{ psi}$ ,  $\mu = 0.20$ .

Paso 6. Definir dimensiones de la losa según modulación propuesta. Estas serán de 1.75 m x 1.75 m.

Paso 7. Definir el criterio del nivel de esfuerzo para optimizar el espesor de la losa. Este será como máximo el 50% del Módulo de Ruptura,  $M_R$ , que equivaldría a **326.61 psi**.

#### 7.8.2. Cálculo de esfuerzos principales con carga ubicada al centro de la losa

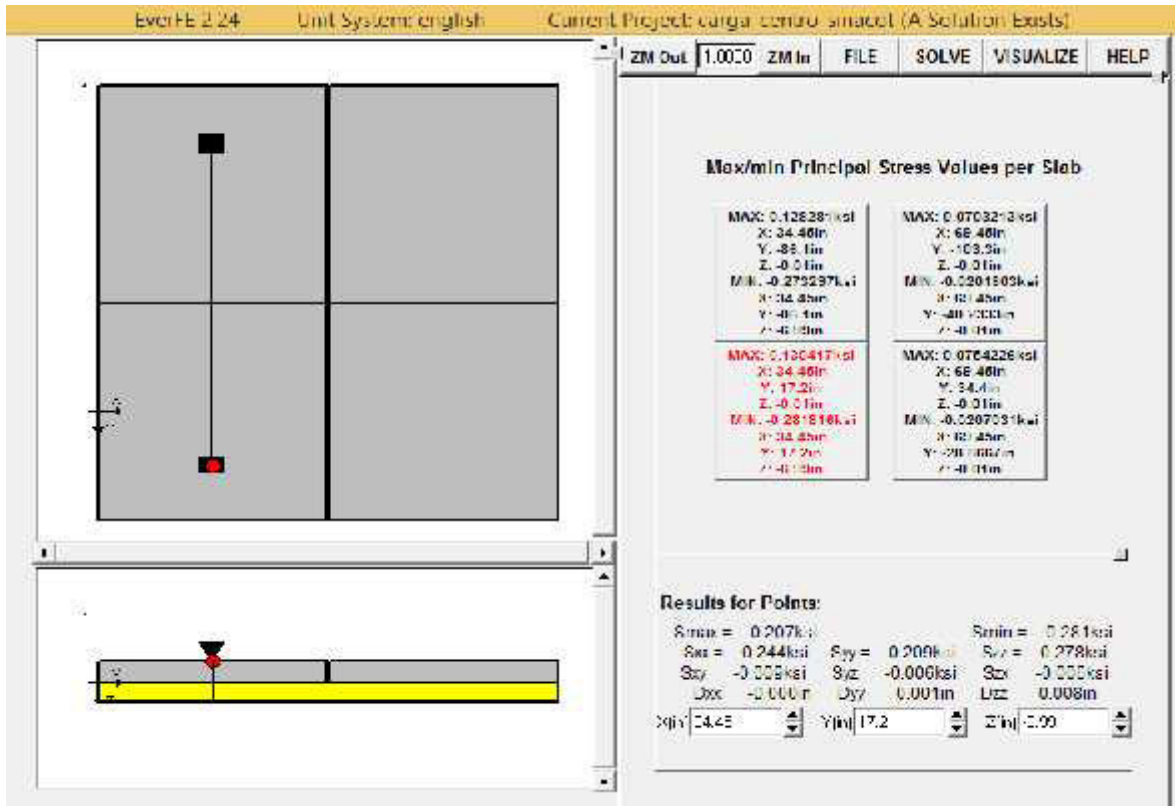
Grafica N°2: Esfuerzos máximos al centro de losa (x-y)



Fuente: Propia



Grafica N°3: Resumen de esfuerzos principales máximos en la parte inferior y superior de la losa con carga ubicada al centro (x-z)

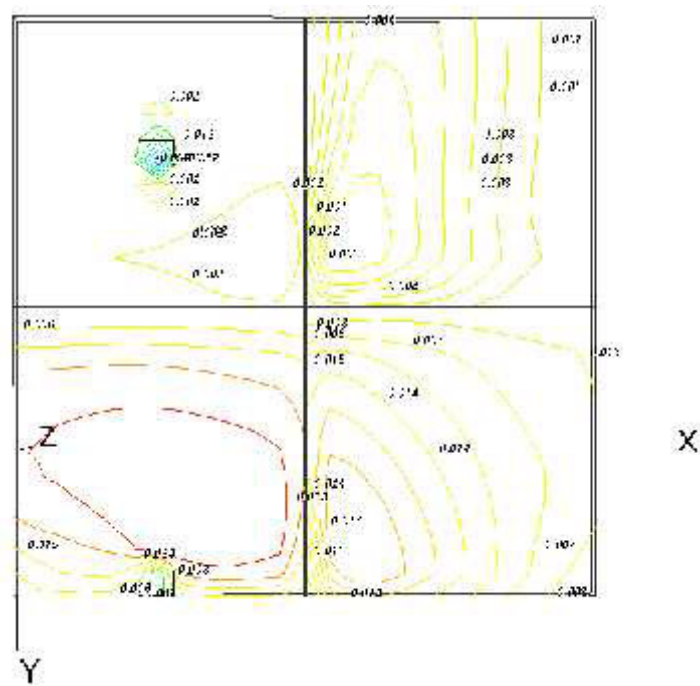
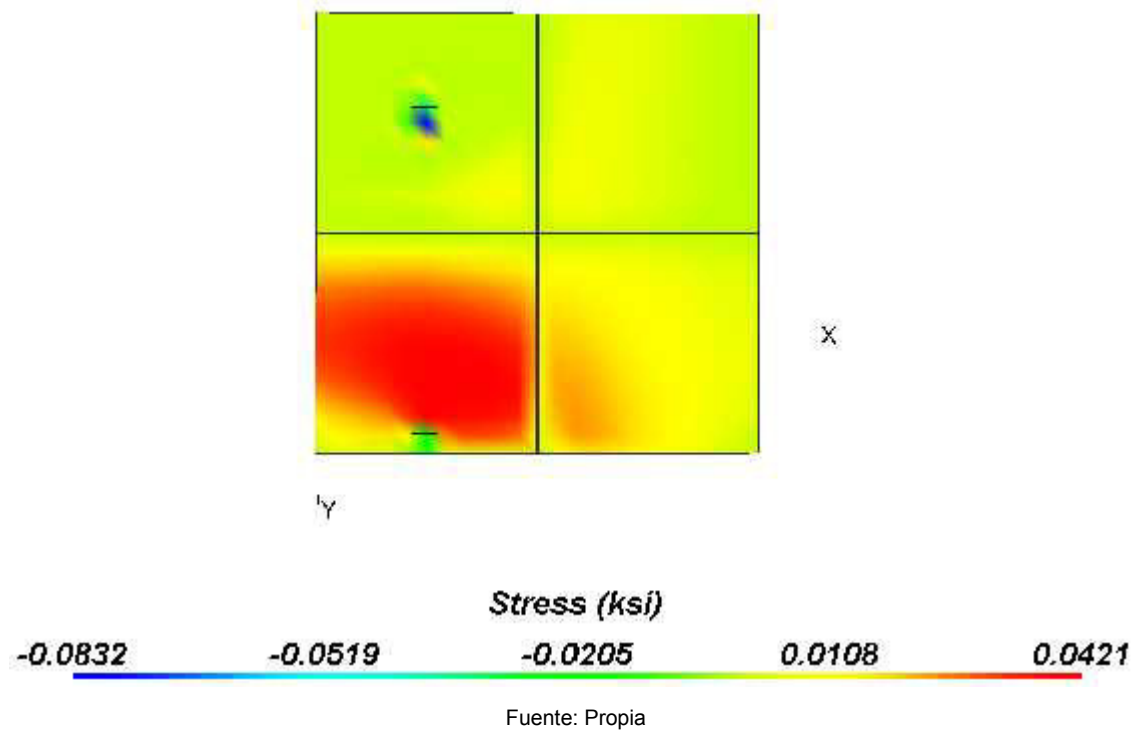


Fuente: Propia

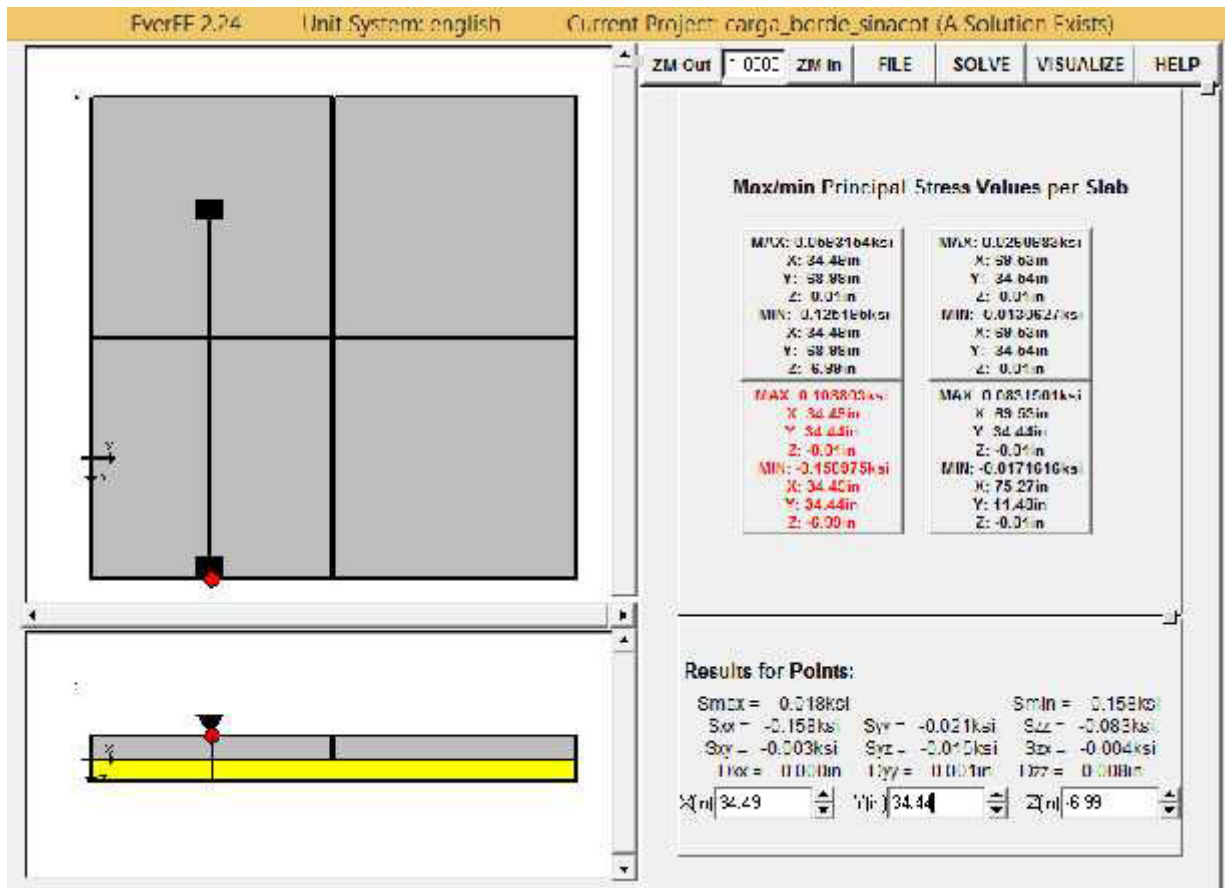


### 7.8.3. Cálculo de esfuerzos principales con carga ubicada al borde de la losa

Grafica N° 4: Esfuerzos máximos al borde de la losa (x-y)

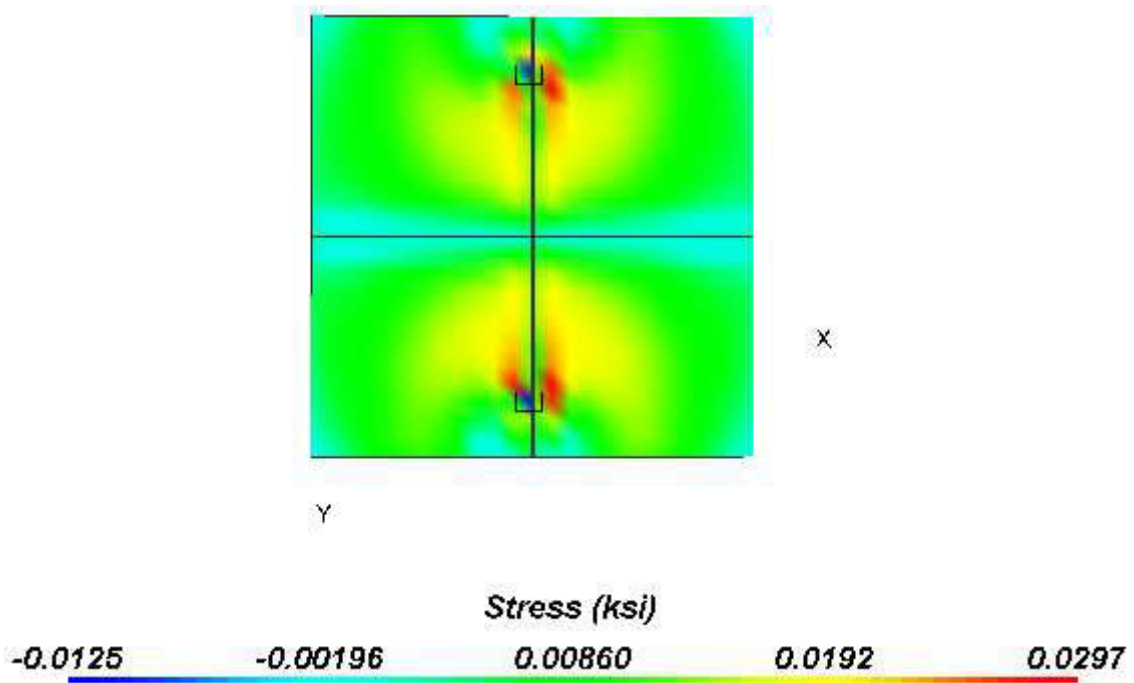


Gráfica N° 5: Resumen de esfuerzos principales máximos en la parte inferior y superior de la losa con carga ubicada al borde (x-z)

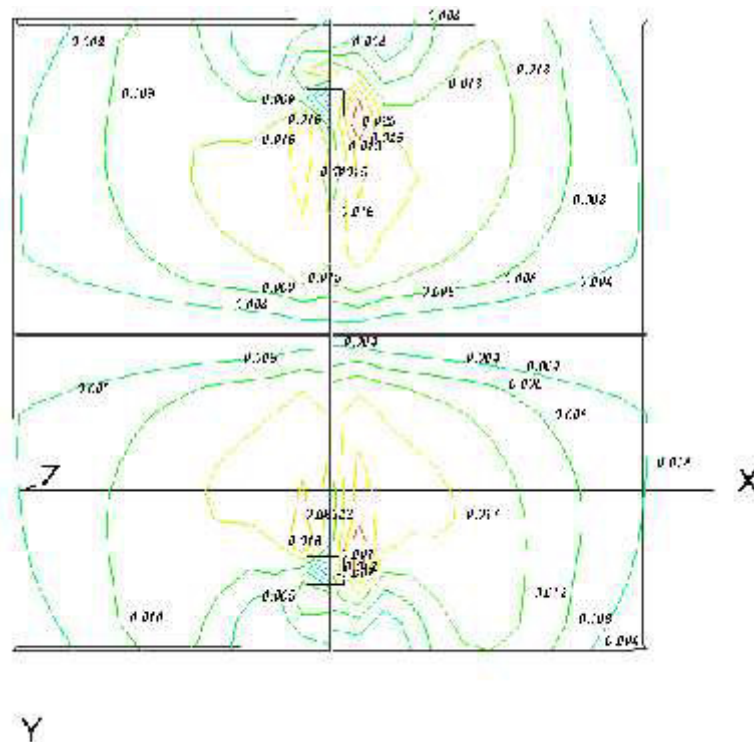


#### 7.8.4. Cálculo de esfuerzos principales con carga ubicada en junta de losa

Grafica N° 6: Esfuerzos máximos en la junta de la losa (x-y)

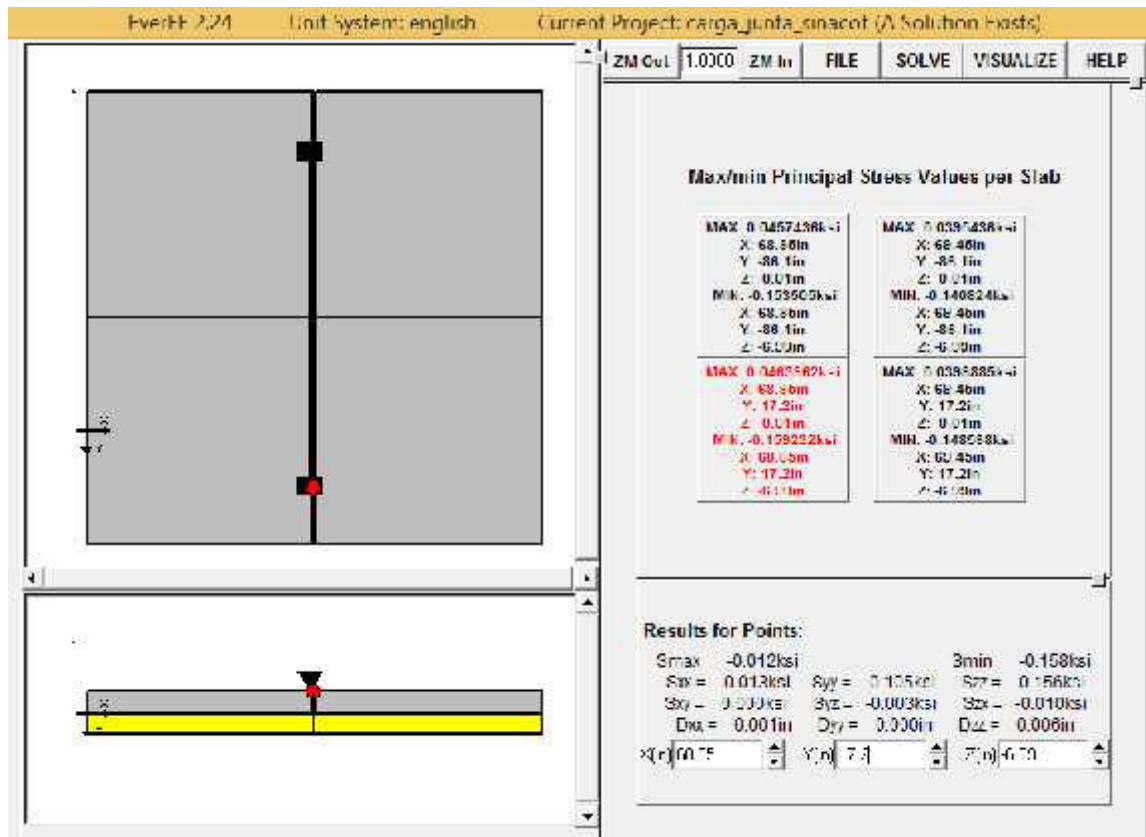


Fuente: Propia



Fuente: Propia.

Grafica N°7: Resumen de esfuerzos principales máximos en la parte inferior y superior de la losa con carga ubicada en la junta (x-z)



Fuente: Propia

### 7.8.5. Análisis de resultados

Obtenido los esfuerzos mediante el software EverFe 2.25, luego de haber introducido nuestras variables de diseño anteriormente definidas y ubicando las cargas correspondientes a un eje tándem de un camión de clasificación C3, en los diferentes puntos críticos de la losa según la modulación propuesta mostramos el resumen de esfuerzos máximos y mínimos en la Tabla N° 13:

TABLA N° 13: RESUMEN DE OBTENCION DE ESFUERZOS MAXIMOS Y MINIMOS				
UBICACIÓN DE CARGA	LOSA CRITICA		CONDICIONANTES	
	ESFUERZOS MÁXIMOS EN LOSA	ESFUERZOS MINIMOS EN LOSA	ESFUERZOS MÁXIMOS PERMISIBLE (50% * Mr)	ESTADO
CENTRO	0.1304 KSI	-0.2818 KSI	< 0.3266 KSI	"PASA"
BORDE	0.1088 KSI	-0.1589 KSI	< 0.3266 KSI	"PASA"
JUNTA	0.0464 KSI	-0.1592 KSI	< 0.3266 KSI	"PASA"

El esfuerzo máximo a la cual va estar sometida nuestra losa propuesta se dará al centro de esta en la parte superior de la misma con un valor de **0.2818 ksi**, estando por debajo de nuestro esfuerzo permisibles de **0.3266 ksi**, confirmando de esta manera el cumplimiento a los criterios de análisis y a los esfuerzos a los que estará sometida nuestra losa propuesta.

## 8. CONCLUSIONES

La utilización de la metodología correcta en la obtención de información en cualquier ámbito, es esencial para la toma de decisiones acertadas con repercusiones positivas en costos y calidad. Los pavimentos compactados con rodillo (CCR) son relativamente nuevos, creándose así la necesidad de definir una metodología correcta tanto para su ejecución como para su etapa de diseño, por ello, la presente tesis ha analizado y ha propuesto las directrices necesarias para la obtención de un espesor de pavimento determinando según las condiciones particulares del proyecto, mediante la metodología propuesta por la PCA en su “Guía para Pavimentos Compactados con Rodillo” complementada con investigaciones particulares realizadas al CCR por otros organismos.

Las diferencias del método de la PCA utilizado para el diseño de espesores de pavimento para Concreto compactado con rodillo como para concreto convencional no son muchas pero probablemente sean incidentes. Las diferencias radican en las propiedades ingenieriles propias del CCR, siendo el esfuerzo a la compresión, el módulo de ruptura y elasticidad valores mayores en referencia al PCC proporcionando una mayor capacidad de carga y mejor asimilación a esfuerzos a tensión sin necesidad de refuerzos o dovelas para la transferencia de carga.

Por consiguiente, obtuvimos un espesor para pavimento compactado con rodillo de 18 cms, el cual es un valor objetivo dentro de los diseños de referencia para concretos convencionales.

Destacamos que la obtención de este espesor de 18 cms, es sin considerar pasajuntas ni soportes laterales, menos aún hierro armado en el interior de la losa. Por ello, surge la necesidad de realizar un análisis de esfuerzos considerando estas situaciones de diseño “*críticas*”, por lo cual, se utilizó EverFe 2.25 como software de apoyo para poder tener una conclusión definitiva en el comportamiento de la losa propuesta. Con los resultados obtenidos de nuestro análisis de esfuerzos con un valor máximo de 0.2818 ksi nos percatamos que el esfuerzo permisible de referencia para CCR es mayor (0.3266 ksi),

por tanto, concluimos que nuestra estructura de pavimento tendrá un comportamiento adecuado a las cargas proyectadas y puntuales a las cuales estará sometida.

## **9. RECOMENDACIONES**

- Analizando la información geotécnica obtenida se recomienda realizar mejoramientos puntuales en ciertas zonas del tramo debido al tipo de suelo encontrado, según indicamos en el anexo N° 7. Esto consiste en extraer el suelo inadecuado existente, llevarlo al botadero y sustituirlo por material selecto de banco; de esta forma evitamos asentamientos puntuales de la estructura de pavimento.
- Se requiere una mayor investigación del comportamiento de CCR para crear tablas para el cálculo de esfuerzos equivalentes y factores de erosión propios de este tipo de pavimentos.
- Así también es conveniente crear nomogramas o similares para la obtención de repeticiones admisibles con información confiable y real de tramos de pruebas existentes.
- A pesar que las fisuras en el CCR aparecen, según investigaciones PCA, a partir de los 4.6 m en adelante es recomendable que al momento de modular nuestra losa no tomemos solamente este criterio para una decisión definitiva, sino también, la incidencia que tienen los esfuerzos en losas con modulaciones muy amplias.
- Se recomienda realizar un estudio del progreso del deterioro de pavimentos compactado con rodillo construidos con losas de dimensiones superficiales menores a las convencionales para poder determinar la funcionalidad de estos en la práctica.
- También es conveniente cuando se tienen esfuerzos muy elevados a los permisibles en el borde de la losa, proceder a realizar un análisis con soportes laterales como por ejemplo un hombro de 1.50 m.

## **10. BIBLIOGRAFIA**

- ACI (American Concrete Institute) Manual of Concrete Practice 2012, Parte 3.
- Concreto Compactado con Rodillo “CCR”, Universidad de Sonora, Capitulo 5.
- Guía para el Diseño y Construcción de Pavimentos Rígidos, Ing. Aurelio Salar Rodríguez, IMCYC.
- Guide for Roller-Compacted Concrete Pavements, National Concrete Pavement Technology Center, August 2010.
- INFORME TECNICO. Algunas consideraciones sobre aspectos relacionados con el Concreto Compactado con Rodillo (CCR) empleado en la construcción de Pavimentos. San Salvador, El Salvador, Septiembre de 2003.
- Instituto Nicaragüense del Cemento y el Concreto (INSYC), Boletín Técnico/Junio 2012/Numero 35.
- METODOLOGIA. Diseño y Desarrollo del Proceso de la Investigación. Carlos E. Méndez A. - Tercera Edición.
- Notas Técnicas, Concreto Compactado con Rodillo, Instituto Colombiano de Productores de Cemento (ICPC).
- Plan Estratégico del Transporte Nacional e Internacional – MTI.
- Red Vial por Clasificación Funcional – MTI.
- Tecnología y Conceptos en Concreto Compactado con Rodillo. IBRACON 2010. Bernardo Martínez.
- Tesis: Pavimento de Concreto Compactado con Rodillos, Universidad Nacional de Ingeniería.



**ANEXOS**

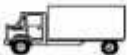




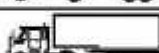


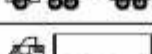
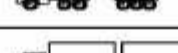


**ANEXO 1:**  
**DIAGRAMA DE CARGAS PERMISIBLES.**  
**PESOS MÁXIMOS PERMISIBLES POR TIPO DE BEHÍCULOS**



**REPÚBLICA DE NICARAGUA**  
**MINISTERIO DE TRANSPORTE E INFRAESTRUCTURA**  
**DIRECCIÓN GENERAL DE VIALIDAD**



**DIAGRAMA DE CARGAS PERMISIBLES**  
**PESOS MÁXIMOS PERMISIBLES POR TIPO DE VEHÍCULOS**

TIPO DE VEHÍCULOS	ESQUEMAS DE VEHÍCULOS	PESO MÁXIMO AUTORIZADO						Peso Máximo Total (t) Ton - Met.
		1er. Eje	2do. Eje	3er. Eje	4to. Eje	5to. Eje	6to. Eje	
C2		5.00	10.00					15.00
C3		5.00	16.50					21.50
			8.25	8.25				
C4		5.00	20.00					25.00
			6.67	6.66	6.66			
T2-S1		5.00	9.00	9.00				23.00
T2-S2		5.00	9.00	16.00				30.00
				8.00	8.00			
T2-S3		5.00	9.00	20.00				34.00
				6.67	6.66	6.66		
T3-S1		5.00	16.00		9.00			30.00
			8.00	8.00				
T3-S2		5.00	16.00		16.00			37.00
			8.00	8.00	8.00	8.00		
T3-S3		5.00	16.00		20.00			41.00
			8.00	8.00	6.67	6.66	6.66	
C2-R2		4.50	9.00	4.0 a	4.0 a			21.50
		4.50	9.00	6.5 b	6.5 b			26.50
C3-R2		5.00	16.00		4.0 a	4.0 a		29.00
		5.00	8.00	8.00	6.5 b	6.5 b		34.00
C3-R3		5.00	16.00		4.0 a	5.0 a	5.0 a	35.00
		5.00	8.0 b	8.0 b	6.5 b	5.0 b	5.0 b	37.50

**NOTA:** El peso máximo permisible será el menor entre el especificado por el fabricante y el contenido en esta columna.

*a :* Eje sencillo llanta sencilla.

*b :* Eje sencillo llanta doble.

**ANEXO 2:**  
**RESULTADOS DE VALOR SOPORTE (CBR) EN MATERIALES DE LA  
PLATAFORMA DEL CAMINO.**

**ALFONSO JEREZ F.**  
**CONSULTOR EN INGENIERIA GEOTECNICA (INGENICA)**  
Calle 14 de Septiembre, P del H 2 c. al Este, Teléfonos: 2240-0648; 288-38780, Managua-Nicaragua

**Resultados de Valor Soporte (CBR) en Materiales de la Plataforma del Camino**

**Cliente:** EDICO, Ingenieros Consultores **Fecha:** May-11  
**Proyecto:** San Sebastian de Yali - Condega

ESTACION Km + m	PROFUNDIDAD (cm)		DESCRIPCION DEL MATERIAL	Clasificación AASHTO		Densidad Seca kg/m3	Humedad Optima %	Valor de CBR (%)		
	De	A		Grupo	IG			90%	95%	100%
0+500	0	10	Grava pobremente gradada con Limos y Arena	A-1-a	0	1794	16	40.0	50.0	60.0
1+000	25	150	Grava pobremente gradada con Limos	A-1-a	0	1785	20	35.0	45.0	50.0
1+500	15	70	Grava pobremente gradada con Limos y Arena	A-1-a	0	1764	16	45.0	55.0	65.0
2+000	28	150	Grava bien gradada con Arcilla	A-2-7	0	1450	17	2.9	7.3	11.7
2+500	25	50	Grava bien gradada con Limos	A-1-a	0	1826	18	50.0	60.0	70.0
3+000	28	100	Grava Limosa con Arena	A-2-4	0	1620	19	2.5	9.8	17.2
3+500	15	80	Grava pobremente gradada con Limos	A-2-7	0	1818	15	28.0	32.0	36.0
4+000	25	125	Grava Limosa con Arena	A-2-4	0	1515	14	1.5	1.6	1.8
4+500	60	150	Grava Limosa con Arena	A-2-4	0	1485	25	8.0	12.0	16.0
5+000	38	100	Grava Arcillosa	A-2-7	0	1530	20	1.2	1.7	2.2
5+500	30	75	Grava pobremente gradada con Limos y Arena	A-1-a	0	1921	13	50.0	60.0	70.0
6+000	32	100	Grava Limosa con Arena	A-1-a	0	1670	23	31.0	36.0	41.0
6+500	30	70	Arena Limosa con Grava	A-7-5	3	1578	23	1.0	2.0	3.0
7+000	8	30	Grava Arcillosa Limosa con Arena	A-2-4	0	2030	12	2.5	15.7	28.9
7+500	30	150	Grava bien gradada con Arcilla y Arena	A-2-6	0	1904	13	30.0	38.0	46.0
8+000	15	100	Arena Arcillosa con Grava	A-7-6	4	1400	23	1.8	2.4	3.0
8+500	40	100	Limo Elastico Gravoso con Arena	A-7-5	10	1457	24	3.0	4.0	5.0
9+000	15	80	Arena Arcillosa con Grava	A-6	2	1745	15	12.0	15.0	18.0
9+500	12	60	Arena Arcillosa con Grava	A-2-6	0	1800	13	7.1	12.5	17.8
10+000	16	65	Arena Arcillosa Limosa con Grava	A-2-4	0	1836	16	38.0	44.0	50.0
10+500	20	50	Grava pobremente gradada Arcillo Limosa con Arena	A-1-a	0	1830	14	35.0	41.0	47.0
11+000	30	70	Arena Limosa	A-2-6	0	1442	30	32.0	38.0	44.0
11+500	14	55	Arcilla baja Arenosa	A-6	7	1560	17	4.2	6.7	9.2
12+000	18	150	Limo Arenoso	A-6	7	1462	28	7.0	11.0	14.0
12+500	18	80	Limo con Arena	A-7-5	11	1440	18	3.7	6.0	8.3
13+000	50	150	Limo Arenoso	A-7-6	5	1501	27	1.0	2.0	3.0
13+500	60	90	Grava Arcillosa con Arena	A-2-6	0	1660	16	2.0	5.2	8.0
14+000	18	60	Grava Limosa con Arena	A-2-6	0	1772	18	29.0	37.0	45.0
14+500	20	40	Grava Limosa con Arena	A-2-6	0	1600	14	5.0	5.4	5.7

**ANEXO N°3**  
**ESFUERZOS EQUIVALENTES PARA PAVIMENTOS SIN APOYO LATERAL**  
**Eje Sencillo / Eje Tándem /Eje Tridem**

Espesor de Losa, (pulgadas)	k de la subrasante, pci																				
	50			100			150			200			300			500			700		
	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri
4.0	825	679	510	726	585	456	671	542	437	634	516	428	584	486	419	523	457	414	484	443	412
4.5	699	586	439	616	500	380	571	460	359	540	436	349	496	406	339	486	378	331	417	383	328
5.0	602	516	387	531	436	328	493	396	305	467	376	293	432	349	282	390	321	272	363	307	269
5.5	526	461	347	464	387	290	431	353	266	409	331	253	379	305	240	343	278	230	320	264	226
6.0	465	416	315	411	348	261	362	316	237	362	296	223	336	271	209	304	246	198	285	232	193
6.5	417	380	289	367	317	236	341	286	214	314	267	201	300	244	186	273	220	173	256	207	166
7.0	375	349	267	331	290	219	307	262	196	292	244	183	272	222	167	246	199	154	231	186	146
7.5	340	323	247	300	268	203	279	241	181	265	224	168	246	203	153	224	181	138	210	169	132
8.0	311	300	230	274	249	189	255	223	168	242	208	156	225	188	141	205	167	126	192	155	120
8.5	285	281	215	252	232	177	234	208	158	222	193	145	206	174	131	188	154	116	177	143	109
9.0	264	264	200	232	218	166	216	195	148	205	181	136	190	163	122	174	144	108	163	133	101
9.5	245	248	187	215	205	157	200	183	140	190	170	129	176	153	115	161	134	101	151	124	93
10.0	228	235	174	200	193	148	186	173	132	177	160	122	164	144	108	150	126	95	141	117	87
10.5	213	222	163	187	183	140	174	164	125	165	151	115	153	136	103	140	119	89	132	110	82
11.0	200	211	153	175	174	132	163	155	119	154	143	110	144	129	98	131	113	85	123	104	78
11.5	188	201	142	165	165	125	153	148	113	145	138	104	135	122	93	123	107	80	116	98	74
12.0	177	192	133	155	158	119	144	141	108	137	130	100	127	116	89	116	102	77	109	93	70
12.5	168	183	123	147	151	113	136	135	103	129	124	95	120	111	85	109	97	73	103	89	67
13.0	159	176	114	139	144	107	129	129	98	122	119	91	113	106	81	103	93	70	97	85	64
13.5	152	168	105	132	138	101	122	123	93	116	114	87	107	102	78	98	89	67	92	81	64
14.0	144	162	97	125	133	96	116	118	89	110	109	83	102	98	75	93	85	65	88	78	59

**ANEXO N°4**  
**FACTORES DE EROSION, PARA PAVIMENTOS SIN PASA JUNTAS Y SIN**  
**APOYO**

**Eje sencillo / Eje Tandem / Eje Tridem**



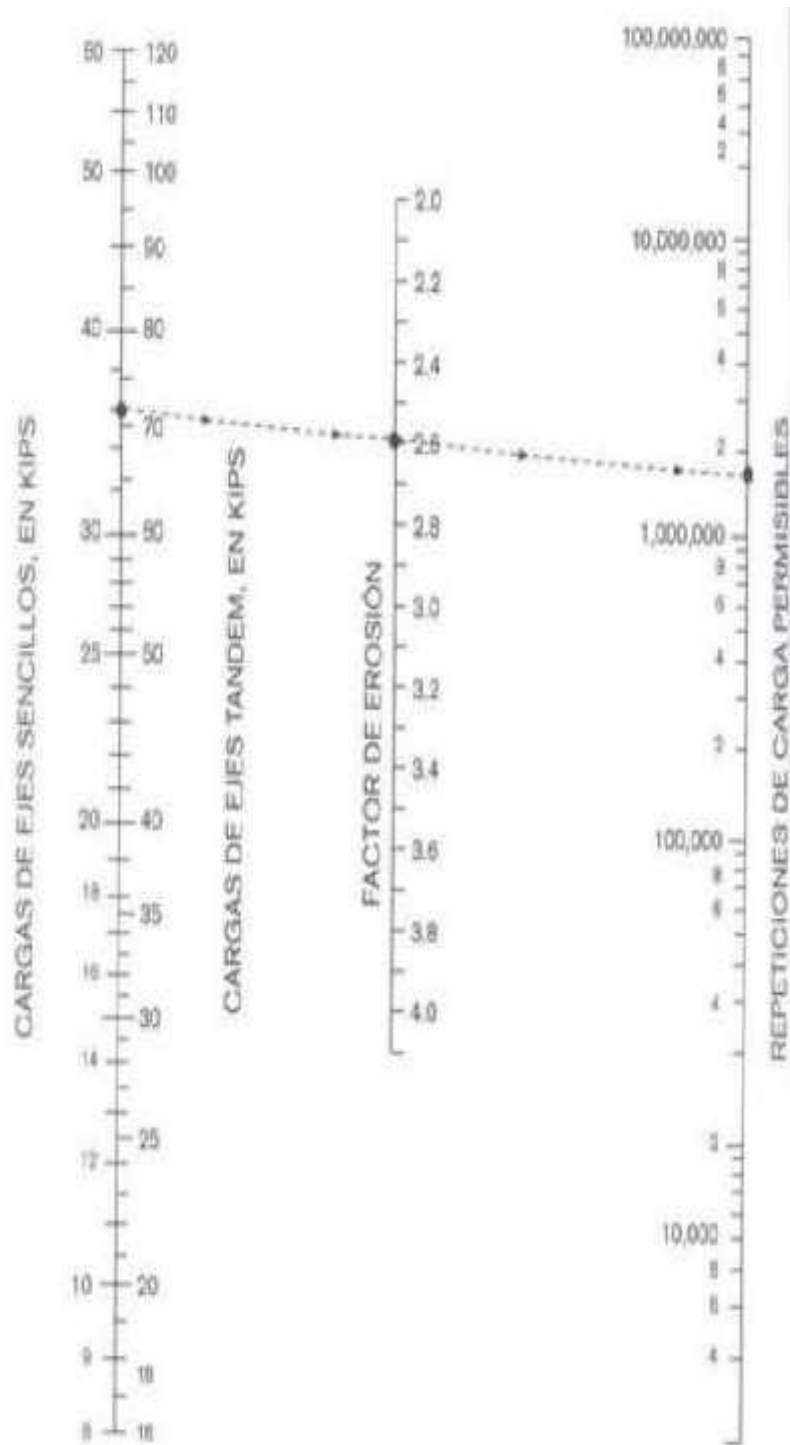
## Eje sencillo / Eje Tandem / Eje Tridem

Espesor de Losa, (pulgadas)	k de la subrasante, pci																	
	50			100			200			300			500			700		
	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri
4.0	3.94	4.03	4.08	3.91	3.95	3.97	3.88	3.89	3.89	3.86	3.86	3.82	3.82	3.83	3.74	3.77	3.80	3.67
4.5	3.79	3.91	3.95	3.76	3.82	3.85	3.73	3.75	3.76	3.71	3.72	3.70	3.68	3.68	3.63	3.64	3.65	3.56
5.0	3.66	3.81	3.85	3.63	3.72	3.75	3.60	3.64	3.66	3.58	3.60	3.60	3.55	3.55	3.52	3.52	3.52	3.46
5.5	3.54	3.72	3.76	3.51	3.62	3.66	3.48	3.53	3.56	3.46	3.49	3.51	3.43	3.44	3.43	3.41	3.40	3.37
6.0	3.44	3.64	3.68	3.40	3.53	3.58	3.37	3.44	3.48	3.35	3.40	3.42	3.32	3.34	3.35	3.30	3.30	3.29
6.5	3.34	3.56	3.61	3.30	3.46	3.50	3.26	3.36	3.40	3.25	3.31	3.34	3.22	3.25	3.27	3.20	3.21	3.21
7.0	3.26	3.46	3.54	3.21	3.39	3.43	3.17	3.29	3.33	3.15	3.24	3.27	3.13	3.17	3.20	3.11	3.13	3.14
7.5	3.18	3.43	3.48	3.13	3.32	3.37	3.09	3.22	3.26	3.07	3.17	3.20	3.04	3.10	3.13	3.02	3.06	3.08
8.0	3.11	3.37	3.42	3.05	3.26	3.31	3.01	3.16	3.20	2.99	3.10	3.14	2.96	3.03	3.07	2.94	2.99	3.01
8.5	3.04	3.32	3.37	2.98	3.21	3.25	2.93	3.10	3.15	2.91	3.04	3.09	2.89	2.97	3.01	2.87	2.93	2.95
9.0	2.98	3.27	3.32	2.91	3.16	3.20	2.86	3.05	3.09	2.84	2.99	3.03	2.81	2.92	2.95	2.79	2.87	2.90
9.5	2.92	3.22	3.27	2.85	3.11	3.15	2.80	3.00	3.04	2.77	2.94	2.98	2.75	2.86	2.90	2.73	2.81	2.85
10.0	2.86	3.18	3.22	2.79	3.06	3.11	2.74	2.95	3.00	2.71	2.89	2.93	2.68	2.81	2.85	2.66	2.76	2.80
10.5	2.81	3.14	3.18	2.74	3.02	3.06	2.68	2.91	2.95	2.65	2.84	2.89	2.62	2.76	2.81	2.60	2.72	2.75
11.0	2.77	3.10	3.14	2.69	2.98	3.02	2.63	2.86	2.91	2.60	2.80	2.84	2.57	2.72	2.77	2.54	2.67	2.71
11.5	2.72	3.06	3.10	2.64	2.94	2.98	2.58	2.82	2.87	2.55	2.76	2.80	2.51	2.68	2.72	2.49	2.63	2.67
12.0	2.68	3.03	3.07	2.60	2.90	2.95	2.53	2.78	2.83	2.50	2.72	2.76	2.46	2.64	2.68	2.44	2.59	2.63
12.5	2.64	2.99	3.03	2.55	2.87	2.91	2.48	2.75	2.79	2.45	2.68	2.73	2.41	2.60	2.65	2.39	2.55	2.59
13.0	2.60	2.96	3.00	2.51	2.83	2.88	2.44	2.71	2.76	2.40	2.65	2.69	2.38	2.56	2.61	2.34	2.51	2.56
13.5	2.56	2.93	2.97	2.47	2.80	2.84	2.40	2.68	2.73	2.36	2.61	2.66	2.32	2.53	2.58	2.30	2.48	2.52
14.0	2.53	2.90	2.94	2.44	2.77	2.81	2.36	2.65	2.69	2.32	2.58	2.63	2.28	2.50	2.54	2.25	2.44	2.48

**Anexo N°5**

**ANÁLISIS DE EROSION, REPETICIONES DE CARGA PERMISIBLE,  
CARGAS DE EJES SENCILLOS Y EJES TANDEM, EN KIPS**

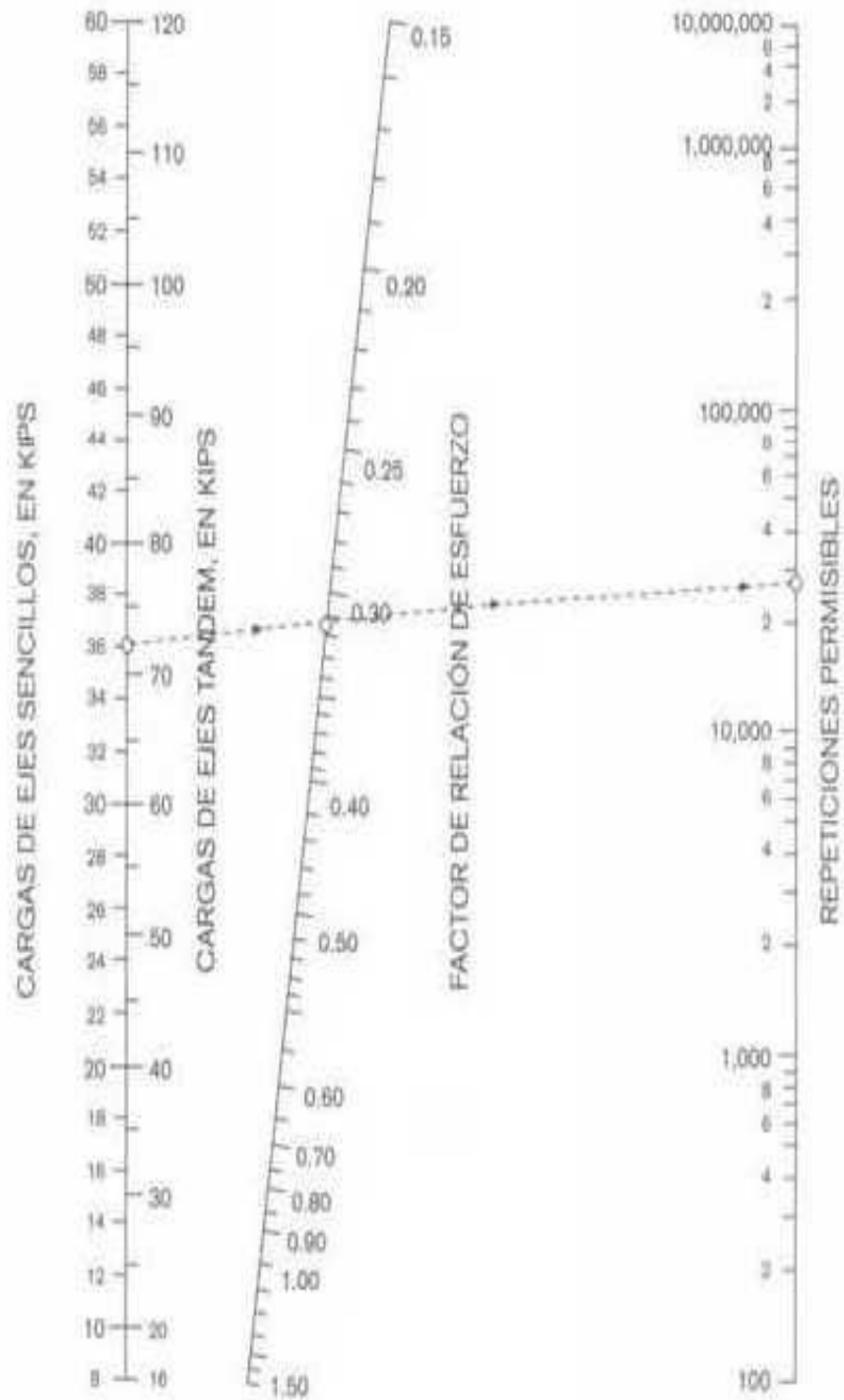
**ANÁLISIS DE EROSION, REPETICIONES DE CARGA PERMISIBLE,  
CARGAS DE EJES SENCILLOS Y EJES TANDEM, EN KIPS**



## **ANEXO N°6**

**ANÁLISIS POR FATIGA (REPETICIONES PERMISIBLES BASADAS EN EL  
FACTOR DE RELACIÓN DE ESFUERZO, CON O SIN APOYO LATERAL.**

**ANÁLISIS POR FATIGA (REPETICIONES PERMISIBLES BASADAS EN EL FACTOR DE RELACIÓN DE ESFUERZO, CON O SIN APOYO LATERAL.**



**ANEXO N°7**

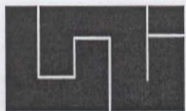
**PROPOSICIONES PUNTUALES DE MEJORAMIENTOS DE SUELOS, CON  
MATERIAL SELECTO, (SUB-EXCAVACIÓN)**

TRAMO: SAN SEBASTIAN DE YALÍ - CONDEGA							
ACTIVIDAD: SUBEXCAVACIÓN							
DE ESTACION	A ESTACION	CLASIFICACION AASHTO ENCONTRADA	BANDA	LONGITUD (m)	ANCHO (m)	PROFUNDIDA (m)	VOLUMEN (m3)
6+400.00	6+600.00	A-7-5	LC	200.00	4.00	0.80	640.00
7+900.00	8+100.00	A-7-6	BI	200.00	4.00	1.00	800.00
8+400.00	8+600.00	A-7-5	BI	200.00	4.00	1.00	800.00
12+400.00	12+600.00	A-7-5	BD	200.00	4.00	0.90	720.00
12+900.00	13+100.00	A-7-6	BI	200.00	4.00	1.50	1,200.00
18+400.00	18+600.00	A-7-6	BI	200.00	4.00	1.50	1,200.00

Fuente: Propia







UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA  
FACULTAD DE TECNOLOGÍA DE LA CONSTRUCCIÓN

SECRETARÍA DE FACULTAD

F-8: CARTA DE EGRESADO

El Suscrito Secretario de la **FACULTAD DE TECNOLOGIA DE LA CONSTRUCCION** hace constar que:

SMITH TURCIOS IRAYDA MARÍA

Carne: **2005-21016** Turno **Nocturno** Plan de Estudios **97** de conformidad con el Reglamento Académico vigente en la Universidad, es **EGRESADO** de la Carrera de **INGENIERIA CIVIL**.

Se extiende la presente **CARTA DE EGRESADO**, a solicitud del interesado en la ciudad de Managua, a los veinte días del mes de marzo del año dos mil dieciocho.

Atentamente,



Dr. Francisco Efraín Chamorro Blandón  
Secretario de Facultad



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA  
FACULTAD DE TECNOLOGÍA DE LA CONSTRUCCIÓN

SECRETARÍA DE FACULTAD

F-8: CARTA DE EGRESADO

El Suscrito Secretario de la FACULTAD DE TECNOLOGIA DE LA CONSTRUCCION hace constar que:

HALFORD SÁENZ RALPH SANDY

Carne: 2005-21389 Turno Nocturno Plan de Estudios 97 de conformidad con el Reglamento Académico vigente en la Universidad, es EGRESADO de la Carrera de INGENIERIA CIVIL.

Se extiende la presente CARTA DE EGRESADO, a solicitud del interesado en la ciudad de Managua, a los veinte días del mes de marzo del año dos mil dieciocho.

Atentamente,

Dr. Francisco Efraín Chamorro Blandón  
Secretario de Facultad





# HOJA DE MATRICULA

## AÑO ACADEMICO 2018

No. Recibo **76254**

No. Inscripción **1286**

**NOMBRES Y APELLIDOS:** IRAYDA MARÍA SMITH TURCIOS

**CARRERA:** INGENIERIA CIVIL

CARNET: 2005-21016

TURNNO:

PLAN DE ESTUDIO: 97

**SEMESTRE : PRIMER SEMESTRE**  
**2018**

FECHA: 20/03/2018

No.	ASIGNATURA	GRUPO	AULA	CRED.	F	R
1	ULTIMA LINEA					

F:Frecuencia de Inscripciones de Asignatura R: Retiro de Asignatura.

ISOZA

## GRABADOR

FIRMA Y SELLO DEL  
FUNCIONARIO

FIRMA DEL  
ESTUDIANTE

cc:ORIGINAL:ESTUDIANTE - COPIA:EXPEDIENTE.

IMPRESO POR SISTEMA DE REGISTRO ACADEMICO EL 20-mar.-2018

IMPRESO POR SISTEMA DE REGISTRO ACADEMICO EL 20-mar.-2018